



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**ANALÝZA OPERAČNÍCH NÁKLADŮ  
OBRÁBĚCÍHO PROCESU**

ANALYSIS OF THE OPERATING COSTS OF THE MACHINING PROCESS

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Bc. Josef Šikula

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

doc. Ing. Jaroslav Prokop, CSc.

BRNO 2017

## Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie  
Student: **Bc. Josef Šíkula**  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Strojírenská technologie  
Vedoucí práce: **doc. Ing. Jaroslav Prokop, CSc.**  
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

### Analýza operačních nákladů obráběcího procesu

#### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Analýza operačních nákladů obráběcího procesu a jejich optimalizace.

#### Cíle diplomové práce:

1. Specifikace operačních nákladů obráběcího procesu.
2. Kvantifikace složek operačních nákladů obráběcího procesu.
3. Analýza operačních nákladů pro vybrané obráběcí procesy.
4. Operační náklady obráběcího procesu jako kritérium jeho optimalizace.

#### Seznam literatury:

- AB SANDVIK COROMANT - SANDVIK CZ s.r.o. Příručka obrábění - Kniha pro praktiky. Přel. M. Kudela. 1. vyd. Praha: Scientia, s.r.o. 1997. 857 s. Přel. z: Modern Metal Cutting - A Practical Handbook. ISBN 91-972299-4-6.
- FOREJT, M., PÍŠKA, M. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. 2006. 226 s. ISBN 80-214-2374-9.
- KOCMAN, K., PROKOP, J. Technologie obrábění. 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. 2005. 270 s. ISBN 80-214-1996-2.
- KŘÍŽ, R., VÁVRA, P. Strojírenská příručka 7. svazek. 1. vyd. Praha: Scientia, spol. s r.o. 1996. 212 s. ISBN 80-7183-024-0.
- MÁDL, J., KVASNIČKA, I. Optimalizace obráběcího procesu. ČVUT Praha. 1989. 168 s. ISBN 80-01-01864-6.

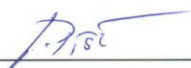
PÍŠKA, M. a kol. Speciální technologie obrábění. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Akademické nakladatelství CERM s.r.o. Brno. 2009. 252 s. ISBN 978-80-214-4025-8.

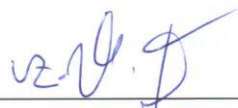
ZEMČÍK, O. Technologická příprava výroby. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Akademické nakladatelství CERM s.r.o., Brno. 2002. 158 s. ISBN 80-214-2219-X.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17.

V Brně, dne 4. 11. 2016



  
\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
ředitel ústavu

  
\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Jaroslav Katořický, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá operačními výrobními náklady obráběcího procesu a jejich následnou optimalizací. Jsou zde specifikovány jednotlivé nákladové položky, které vstupují do obráběcího procesu. Pozornost je věnována spotřebě času u jednotlivých metod obrábění. Cílem práce je nalezení optimální kombinace řezné rychlosti a trvanlivosti tak, aby byla splněna kritéria minimálních nákladů a maximální výrobnosti. Výpočty jsou použity pro případy soustružení vnější válcové plochy a čelní plochy konstantní řeznou rychlostí. K práci je přiložené CD s tabulkami a výpočty v programu Microsoft Excel.

## Klíčová slova

obráběcí proces, operační výrobní náklady, optimalizace, trvanlivost řezného nástroje, řezná rychlost

## ABSTRACT

This master's thesis deals with the operating production cost in machining process and further optimization. Individual costs items which are related to machining process are specified. Attention is paid to the time consumption of individual machining methods. The aim of the thesis is to find an optimal combination of cutting speed and durability in order to meet the minimum cost criteria and maximum productivity. The calculations are used for turning the outer cylindrical surface and the face surfaces at a constant cutting speed. The work is accompanied by tables and calculations in Microsoft Excel.

## Key words

machining proces, operating production cost, optimization, life time of cutting tool, cutting speed

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠIKULA, Josef. *Optimalizace operačních nákladů obráběcího procesu*. Brno 2017. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 75 s. 4 přílohy. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jaroslav Prokop, CSc.

### Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Optimalizace operačních nákladů obráběcího procesu** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

---

Datum

---

Bc. Josef Šíkula

### **Poděkování**

Touto cestou bych rád poděkoval svému vedoucímu práce doc. Ing. Jaroslavu Prokopovi, CSc., za ochotu a cenné připomínky, které mi poskytl při vypracovávání diplomové práce.

## OBSAH

ÚVOD .....	9
1 SPECIFIKACE SLOŽEK OPERAČNÍCH NÁKLADŮ OBRÁBĚCÍHO PROCESU .....	10
1.1 Náklady na práci .....	10
1.2 Náklady na nástroj a jeho výměnu .....	10
1.3 Náklady na materiál .....	11
1.4 Režijní náklady .....	11
2 KVANTIFIKACE SLOŽEK OPERAČNÍCH NÁKLADŮ OBRÁBĚCÍHO PROCESU .....	14
2.1 Náklady na jednotkovou práci .....	14
2.1.1 Náklady na jednotkovou strojní práci .....	14
2.1.2 Náklady na minutu strojní práce .....	15
2.1.3 Náklady na jednotkovou vedlejší práci .....	16
2.2 Náklady na nástroj .....	16
2.2.1 Řezivost nástroje .....	17
2.2.2 Obrobitelnost materiálu .....	17
2.2.3 Mechanismy opotřebení řezného nástroje .....	18
2.2.4 Formy opotřebení .....	20
2.2.5 Průběh opotřebení .....	22
2.2.6 Životnost nástroje .....	24
2.2.7 Trvanlivost nástroje .....	24
2.2.8 Náklady nástroj a jeho výměnu .....	27
2.3 Náklady na materiál .....	30
2.3.1 Norma spotřeby materiálu z přířezu .....	31
2.3.2 Norma spotřeby materiálu pro zápusťkové výkovky .....	32
2.3.3 Norma spotřeby materiálu u odlitků .....	33
2.3.4 Stupeň využití materiálu .....	33
2.4 Celkové operační náklady .....	34
3 ANALÝZA OPERAČNÍCH NÁKLADŮ PRO VYBRANÉ OBRÁBĚCÍ PROCESY .....	36
3.1 Soustružení vnější válcové plochy .....	36
3.2 Soustružení čelní plochy .....	37
3.3 Obvodové frézování válcovou frézou .....	38
3.4 Čelní frézování válcovou frézou .....	40
3.4.1 Souměrné frézování .....	40
3.4.2 Nesouměrné frézování .....	41
3.5 Vrtání .....	43

---

4	OPERAČNÍ NÁKLADY OBRÁBĚCÍHO PROCESU JAKO KRITÉRIUM JEHO OPTIMALIZACE.....	45
4.1	Optimalizace trvanlivosti břitu pro kritérium minimálních operačních nákladů .....	45
4.2	Optimalizace řezné rychlosti pro kritérium minimálních operačních nákladů .....	47
4.3	Optimalizace trvanlivosti břitu pro kritérium maximální výrobnosti.....	49
4.4	Optimalizace řezné rychlosti pro kritérium maximální výrobnosti .....	50
4.5	Příklady optimalizace pro soustružení vnější válcové plochy .....	51
4.5.1	Optimalizace pro kritérium minimálních operačních nákladů .....	52
4.5.2	Optimalizace pro kritérium maximální výrobnosti .....	55
4.6	Příklady optimalizace pro soustružení čelní plochy konstantní řeznou rychlostí ....	60
4.6.1	Optimalizace pro kritérium minimálních operačních nákladů .....	60
4.6.2	Optimalizace pro kritérium maximální výrobnosti .....	64
	ZÁVĚR .....	68
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ A ZKRATEK .....	70
	SEZNAM PŘÍLOH .....	75



## ÚVOD

Strojírenství je jedno z nejstarších a nejrozšířenějších průmyslových odvětví nejen v České republice, ale i ve světě. Toto odvětví se nejrychleji rozvíjelo v období průmyslové revoluce. Řada českých strojírenských firem má bohatou historii a i nyní jsou významnou oporou pro českou ekonomiku. Jednou z hlavních oblastí strojírenství je třískové obrábění, které je nepostradatelnou součástí většiny strojírenských oborů, např. automobilového a energetického průmyslu. V dnešní době je třískové obrábění soustředěno především na CNC obráběcí stroje, které umožňují produktivní a velmi přesnou výrobu součástí.

Pro správnou funkci a prosperitu je pro podnik nutností mít přehled o svých nákladech. Ve strojírenské výrobě se náklady na obrábění skládají zejména z nákladů na řezný nástroj, držák nástroje, upínače obrobku a nástroje měřidla, obráběcí stroj, materiál obrobku a také ze mzdových nákladů a režijních nákladů.

Například řezný nástroj má významný vliv na celkové náklady. Avšak moderní řezné nástroje, jsou-li správně použity, vedou k podstatnému snížení výrobních nákladů. Vlastní náklady na nástroje se mohou případ od případu lišit, jsou však bezvýznamné v poměru ke změnám, které mohou být v rámci celkových výrobních nákladů tímto způsobem ovlivněny. Zlepšení jedné z proměnných hodnot procesu obrábění má značný vliv na produktivitu a tím také na návratnost investic.

Zejména při zvýšení řezné rychlosti lze do značné míry snížit čas na opracování jednoho obrobku. Při tomto postupu stroj, který v současné době spotřebuje značný počet pracovních hodin, potřebuje pro opracování jednoho obrobku kratší dobu. A při velkém podílu drahých CNC obráběcích strojů, u kterých se náklady na hodinu práce pohybují v řádech stovek i tisíců korun, je optimalizace řezných podmínek u těchto výrobních zařízení významná.

Optimalizace řezných podmínek není jednoduchou záležitostí. Současně je nutné určit i optimální trvanlivost, protože nelze optimalizaci řezných podmínek a trvanlivost nástroje od sebe oddělit.

Nejčastěji se pro optimalizaci využívají dvě kritéria. Základním kritériem pro optimalizaci obráběcího procesu je kritérium minimálních nákladů. Jeho podstatou je stanovení optimálních pracovních podmínek a také trvanlivosti nástroje. Druhá možnost je využití kritéria maximální výrobnosti. Obrábění podle tohoto kritéria znamená vyrábět maximálně možný počet kusů za určitý čas. Ovšem bez ohledu na výrobní náklady.

V dnešní době se využívá vícekritériální optimalizace, která bere v úvahu mnoho omezení. Omezení mohou být dána například maximálním přípustným krouticím momentem, výkonem na vřetení, maximální drsností povrchu a přesností obrobeného povrchu, řezivostí břitu nástroje, tuhostí soustavy stroj–nástroj–obrodek a další. Pro takovéto řešení se využívá lineárního programování, metoda simplex nebo různé počítačové programy.

## 1 SPECIFIKACE SLOŽEK OPERAČNÍCH NÁKLADŮ OBRÁBĚCÍHO PROCESU

Operační náklady lze obecně vyjádřit jako účelné a účelové vynaložení zdrojů ekonomického růstu (surovin, materiálů, energie, lidské práce apod.) související se zhotovením výrobku, provedením práce nebo poskytnutím služeb [1].

### 1.1 Náklady na práci

#### Náklady na jednotkovou práci

Náklady na jednotkovou práci jsou náklady na výrobu jednoho kusu dané součásti. Tyto náklady se dělí na náklady na jednotkovou strojní práci a na náklady na jednotkovou vedlejší práci.

#### Náklady na jednotkovou strojní práci

Náklady na jednotkovou strojní práci závisí na výrobním zařízení, kterým je součást obráběna, na jeho investičních nákladech, na nákladech na jeho provoz (energie, údržba, opravy, odpisy apod., tedy výrobní režie), instalaci a zaběhnutí do provozu, na přímé mzdě podle požadované kvalifikace pracovníka, který stroj obsluhuje (rozdílná je požadovaná kvalifikace pracovníka např. na vícevřetenovém CNC obráběcím stroji, nebo konvenční svislá vrtačka apod.) a na mnoha dalších faktorech [1].

Obecně se náklady na jednotkovou strojní práci vypočítají z několika časů, mezi které patří čas jednotkové práce za chodu stroje  $t_{A121}$ , kam patří činnosti, které vykonává pracovník při automatickém chodu stroje (pozorování obráběcího cyklu, kontrolní měření). Také se započítává čas jednotkové práce strojně ruční  $t_{A131}$ , to jsou činnosti, které vykonává pracovník ručně v čase, kdy stroj vykonává řezný pohyb. Další je čas jednotkové strojní práce  $t_{AS}$  při automatickém chodu stroje [1].

#### Náklady na jednotkovou vedlejší práci

Náklady na jednotkovou vedlejší práci lze vyjádřit pomocí časů za klidu stroje  $t_{A111}$  a času nepravidelné obsluhy  $t_{A102}$ . Čas za klidu stroje zahrnuje např. čištění pracovní plochy stroje nebo upínání a odepínání obrobku. Do časů nepravidelné obsluhy patří například výměna opotřebovaných nástrojů a jejich seřízení [2].

### 1.2 Náklady na nástroj a jeho výměnu

Náklady na řezné nástroje tvoří nedílnou část ekonomiky výroby, je nutné s nimi počítat už při technologické přípravě výroby. Volbou nejvhodnějšího nástroje lze dosáhnout významných úspor těchto nákladů. Je třeba brát ohled nejen na obráběný materiál, ale i na řezné podmínky. Zejména řezná rychlost má největší vliv na trvanlivosti řezného nástroje.

Při volbě monolitního nástroje je nutné počítat i s náklady na přestřžení. Oproti tomu u vyměnitelných břitových destiček se náklady na jeden břit vypočítají z ceny nástroje a počtu břitů na vyměnitelné břitové destičky (dále VBD).

### 1.3 Náklady na materiál

Náklady na materiál, zejména přímé materiálové náklady (tedy ty, které jsou přímo spotřebovávány na výrobu výrobků), tvoří podstatnou položku nákladů.

Proto je důležitá otázka hospodárného využití materiálu. Je nutné zvážit způsob výroby polotovaru v závislosti na výrobním množství. K tomu se využívá norma spotřeby materiálu.

### 1.4 Režijní náklady

Režijní náklady jsou ty, které se nedají přesně přiřadit k danému výkonu. Tyto náklady jsou společné pro více úkonů při výrobě. Společné náklady se často označují jako střediskové režijní náklady a pro zlepšení ekonomických propočtů, které zahrnují optimalizaci, přesnější kalkulaci a řízení výrobních procesů, je zapotřebí podrobnějšího rozboru těchto nákladů [3].

V jednoduchých průmyslových podnicích mohou být určité rozdíly, zpravidla však k těmto nákladům patří režijní materiál, nářadí a nástroje, režijní mzdy, pojištění, energie, opravy a údržba, náklady na prostor, leasing, ostatní služby, školení, odpady atd. [3].

#### Režijní materiál

Veškerý spotřebovaný materiál, který nemá charakter přímého (ve vztahu k výrobku) materiálu. Tedy obvykle maziva, technologické kapaliny pro obrábění (řezné kapaliny), ochranné pomůcky apod. [3].

#### Nářadí a nástroje

Univerzální a společné nářadí, přípravky a nástroje (které nepatří do hmotného investičního majetku), které nejsou určeny jako speciální vybavení pro určitý výrobek, které v takovém případě mají charakter přímého nákladu k tomuto výrobku. Odpisy hmotného a nehmotného investičního majetku [3].

#### Režijní mzdy

V některých případech pouze mzdy režijních pracovníků. Někdy ovšem i mzdy všech pracovníků středisek, ve kterých jsou výrobní pracovníci placeni dle hodinových tarifů bez ohledu na množství odvedené práce. I když se vyrábí pouze z části kapacity, mzdy jsou vypláceny v předem domluvené výši (zpravidla dle ujednání například kolektivní smlouvy) [3].

### **Sociální a zdravotní pojištění**

Pevná procentní přírážka k vyplaceným režijním mzdám [3].

### **Energie a plyny**

Náklady na energie (elektřina, zemní plyn) a na plyny pro sváření, pokud nejsou zahrnuty do jiných položek, např. při kalkulaci nákladů na provoz obráběcího stroje [3].

### **Opravy a údržba**

Většinou nejde o náklady vztažené k jednotlivým obráběcím strojům [3].

### **Náklady prostoru**

Pokud prostor není vlastní a je najat, je nákladem nájemné, případně plus zvlášť placené služby (teplo, energie, úklid).

Pokud je prostor vlastní, jedná se o náklady na budovu (opravy, údržba, odpisy, daň z nemovitosti, pojistné, úklid), teplo a teplou vodu, studenou vodu, osvětlení a společné energie, náklady speciálního vybavení (jeřáby, zakladače, dopravníky apod.) [3].

### **Nájemné (leasing)**

Platby za najaté stroje a zařízení společného charakteru [3].

### **Ostatní služby**

Náklady dalších výrobních i nevýrobních režijních služeb (režijní přepravné, režijní kooperace, certifikace apod.) [3].

### **Školení a vzdělávání**

Náklady na povinné kvalifikační kurzy (elektor, apod.) [3].

### **Odpad**

Náklady na likvidaci odpadu, včetně např. likvidace řezných kapalin apod. [3].

### **Ostatní**

Náklady na zmetky, reklamace, náklady spojů, režijní cestovné apod. [3].

Pro určení režijních nákladů se nejčastěji používá metoda hodinových režijních paušálů. Pomocí metody se stanoví hodinový režijní paušál, který je určen cenou časové jednotky, nejčastěji hodiny nebo normohodiny, na základě velikosti společných režijních nákladů a za předpokladu využití dané kapacity [3].

Hodinový režijní paušál je tedy určen podílem společných režijních nákladů a stanoveného časového fondu. Metoda hodinových režijních paušálů se dá stanovit pro různá období v měsíci, ke čtvrtletí a podobně nebo k výrobnímu úseku jako celku

anebo jen k části výrobního úseku, např. jeden stroj. Důležitou vlastností hodinových režijních paušálů je to, že by měly být vždy stanovovány pro reálnou kapacitu, tj. pro takovou hodnotu časového fondu, kterou lze reálně dosáhnout, nikoliv hodnotu ideální či jinak nereálné stanovenou [3].

Pokud není míra využití kapacity v okamžiku stanovování hodinových režijních paušálů zcela jistá, je možno stanovit jejich hodnoty v několika variantách pro různou míru využití kapacity [3].

Hodinový režijní paušál lze dle [3] vypočítat jako:

$$HRP = \frac{RN}{KAP} \quad (1.1)$$

kde:

RN [Kč] ... režijní náklady

KAP [hod] ... kapacita střediska

## 2 KVANTIFIKACE SLOŽEK OPERAČNÍCH NÁKLADŮ OBRÁBĚCÍHO PROCESU

Operační výrobní náklady reálného obráběcího procesu se vyjádří na obrobení jedné součásti. Zde se uvažují jen základní složky vztažené k obráběcímu stroji a řeznému nástroji. Obecný postup je dále konkretizován na výrobu jednoduché součásti, kdy se obrábí jedna plocha jedním nástrojem [4].

Náklady na práci se dělí na náklady na strojní práci a náklady na vedlejší práci.

### 2.1 Náklady na jednotkovou práci

Při kvantifikaci nákladů na práci se vychází z jednotkového času. Jednotkový čas je čas činnosti i nečinnosti nezbytně potřebný při zpracování každé jednotky produkce (ks, t, m<sup>3</sup> atd.) [1]. Podrobné členění jednotkového času  $t_A$  je zobrazeno v příloze této práce.

Výpočet jednotkového času je dán vztahem [1]:

$$t_A = t_{A1} + t_{A2} + t_{A3} \quad (2.1)$$

kde:

- $t_A$  [min] ... jednotkový čas
- $t_{A1}$  [min] ... čas jednotkové práce
- $t_{A2}$  [min] ... jednotkový čas obecně nutných přestávek v operaci (čas na oddech u namáhavých prací a podobně)
- $t_{A3}$  [min] ... jednotkový čas podmíněčně nutných přestávek v operaci (čas na ukončení cyklu stroje apod.)

Náklady na jednotkovou práci jsou dány součtem [4]:

$$N_{Ap} = N_{ASp} + N_{AVp} \quad (2.2)$$

kde:

- $N_{Ap}$  [Kč] ... náklady na jednotkovou práci
- $N_{ASp}$  [Kč] ... náklady na jednotkovou strojní práci
- $N_{AVp}$  [Kč] ... náklady na jednotkovou vedlejší práci

#### 2.1.1 Náklady na jednotkovou strojní práci

Náklady na jednotkovou strojní práci souvisí s jednotkovým strojním časem. Ten je potřebný pro obrobení jednoho kusu obrobku. Náklady na strojní práci se obecně vyjadřují vztahem [4]:

$$N_{Sp} = t_{AS} \cdot N_{sm} \quad (2.3)$$

kde:

- $t_{AS}$  [min] ... jednotkový strojní čas
- $N_{sm}$  [Kč] ... náklady na minutu strojní práce

Jednotkový strojní čas se vypočítá ze vztahu [4]:

$$t_{AS} = \frac{L}{v_f} \quad (2.4)$$

kde:

$L$  [mm] ... dráha nástroje ve směru posuvu

$v_f$  [mm·min<sup>-1</sup>] ... posuvová rychlost

### 2.1.2 Náklady na minutu strojní práce

Náklady na minutu strojní práce se dle [3] vyjádří pomocí hodinového režijního paušálu:

$$N_{sm} = k_c \left( \frac{M_o}{60} + \frac{HRP_{SP}}{60} \right) + \frac{N_{hs}}{60} \quad (2.5)$$

kde:

$k_c$  [-] ... přirážka času směnového (obvykle 1,08 až 1,15)

$M_o$  [Kč] ... hodinové mzdové náklady na operátora

$HRP_{SP}$  [Kč] ... hodinový režijní paušál (střediskových nákladů)

$N_{hs}$  [Kč] ... náklady na provoz stroje za hodinu

Hodinové náklady na provoz stroje lze vyjádřit [3]:

$$N_{hs} = O_s \cdot k_{us} + C_E \quad (2.6)$$

kde:

$O_s$  [Kč] ... odpis stroje za hodinu

$k_{us}$  [-] ... koeficient oprav a údržby stroje

$C_E$  [Kč] ... cena spotřebovaných energií za hodinu

Odpis stroje za hodinu se dle [3] spočítá:

$$O_s = \frac{C_{si}}{Z_s \cdot CFS_{EFPL} \cdot SM \cdot k_{vs}} \quad (2.7)$$

kde:

$C_{si}$  [Kč] ... cena stroje plus náklady na instalaci stroje

$Z_s$  [rok] ... životnost stroje

$CFS_{EFPL}$  [hod] ... roční časový fond stroje při jedné směně

$SM$  [-] ... směnnost

$k_{vs}$  [-] ... koeficient časového využití stroje

Koeficient oprav a údržby stroje  $k_{us}$  je dán podílem součtu předpokládané částky na opravy stroje a ceny stroje (údržbou stroje za dobu jeho životnosti a ceny stroje).

Koeficient časového využití stroje  $k_{vs}$  se stanovuje z dlouhodobého průměru, popřípadě z předpokladu o vytížení stroje. Koeficient časového využití stroje se významně podílí na výrobních nákladech [3].

Tab. 2.1 Koeficient časového využití stroje [3].

Druh výroby	$k_{vs}$
Hromadná a velkosériová výroba	0,8
Programově řízené stroje, obráběcí centra	0,65 až 0,75
Konvenční malosériová výroba	0,50 až 0,65

### 2.1.3 Náklady na jednotkovou vedlejší práci

Náklady na vedlejší práci  $N_v$  se vypočítají z časů za klidu stroje  $t_{A111}$  a času nepravidelné obsluhy  $t_{A102}$ . Do nich patří měření součásti, upínání a odepínání obrobku. To znamená časy, kdy je vřeteno stroje v klidu [1]. Náklady na jednotkovou práci se vypočítají podle vzorce:

$$N_{AVp} = t_{AVp} \cdot N_{vm} \quad (2.8)$$

kde:

$N_{AVp}$  [Kč] ... náklady na jednotkovou vedlejší práci

$t_{AVp}$  [min] ... čas jednotkové vedlejší práce

$N_{vm}$  [Kč] ... náklady na minutu vedlejší práce

Čas jednotkové vedlejší práce se spočítá:

$$t_{AVp} = t_{A111} + t_{A102} \quad (2.9)$$

kde:

$t_{A111}$  [min] ... čas jednotkové práce za klidu stroje v operaci

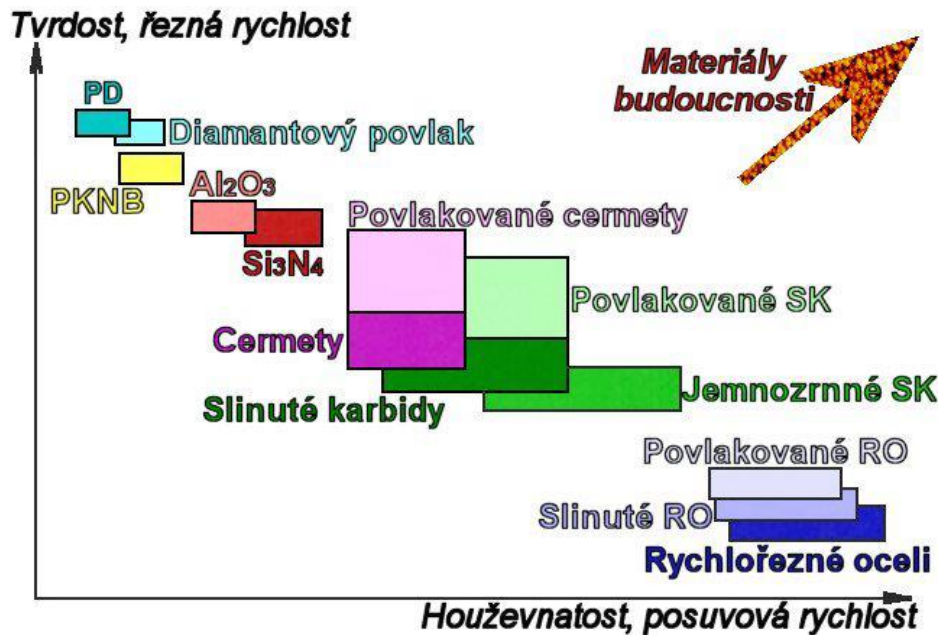
$t_{A102}$  [min] ... čas jednotkové práce nepravidelný

## 2.2 Náklady na nástroj

Výběr správného typu nástroje pro obrábění je důležitou součástí každé technologie. Použitím vhodných nástrojů, optimální technologie a řezných podmínek může být zlepšena kvalita povrchu součásti, snížen odpad a zejména sníženy náklady na výrobu.

Na obr. 2.1 jsou schematicky uvedeny hlavní oblasti aplikace všech současných materiálů pro řezné nástroje, vyjádřené vztahem mezi základními řeznými podmínkami (řezná rychlost – posuvová rychlost), který odpovídá vztahu mezi jejich základními vlastnostmi (tvrdost – houževnatost).





Obr. 2.1 Oblasti použití řezných materiálů [3].

### 2.2.1 Řezivost nástroje

Řezivost nástroje lze charakterizovat jako vlastnost, která umožňuje nástroji efektivním způsobem odebrat třísku z obráběného materiálu. Je vlastností relativní, protože závisí i na obráběném materiálu [8].

### 2.2.2 Obrobitelnost materiálu

Obrobitelnost materiálu je schopnost materiálu být obráběn za konkrétních pracovních podmínek. Zahrnuje vliv mechanických a fyzikálních vlastností materiálu, chemického složení, tepelného zpracování, struktury a způsobu výroby polotovaru na kvalitativní, kvantitativní a ekonomické výsledky procesu řezání [8].

Absolutní obrobitelnost závisí i na mnoha faktorech, zejména na způsobu obrábění a řezných podmínkách. Proto se v praxi nejčastěji používá relativní hodnocení obrobitelnosti, které se pro daný sledovaný materiál určuje porovnáním s jiným materiálem (etalonem), obráběným stejným nástrojem za stejných pracovních podmínek [7].

Strojírenské materiály pro potřeby určení jejich obrobitelnosti jsou zařazeny do devíti skupin, označených písmeny malé abecedy [6]:

- a – litiny,
- b – oceli,
- c – těžké neželezné kovy a jejich slitiny (měď a slitiny mědi),
- d – lehké neželezné kovy a jejich slitiny (hliník a slitiny hliníku),
- e – tvrzené litiny pro výrobu válců,
- f – plastické hmoty,

g – přírodní nerostné hmoty,  
h – vrstvené hmoty,  
v – pryže.

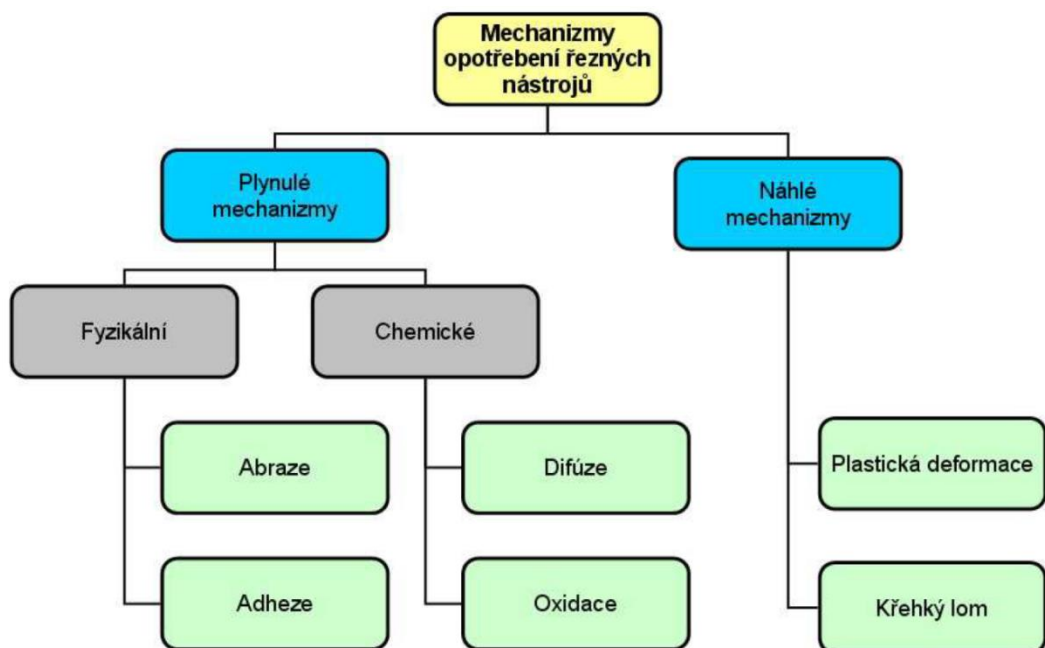
### Opotřebení řezného nástroje

Při obrábění dochází mezi nástrojem a obrobkem k relativnímu pohybu a ke kontaktu (na hlavním a vedlejším hřbetě a špičce nástroje). Dále také dochází k relativnímu pohybu a ke kontaktu mezi nástrojem a třískou (na čele nástroje). Z těchto důvodů je patrné, že musí docházet k opotřebení nástroje [9].

Pohled na břit při zvětšení a posouzení, jaká opotřebení jsou na něm viditelná, umožňuje kontrolovat vhodnost trvanlivosti, její spolehlivost a dokonce i možnost jejího prodloužení. Pro každý proces existuje optimální průběh opotřebení. Správný nástroj a odpovídající řezné podmínky, dobrá jakost materiálu obrobku a dobré podmínky pro obrábění jsou důležitými předpoklady pro optimálního průběh opotřebení [10].

### 2.2.3 Mechanismy opotřebení řezného nástroje

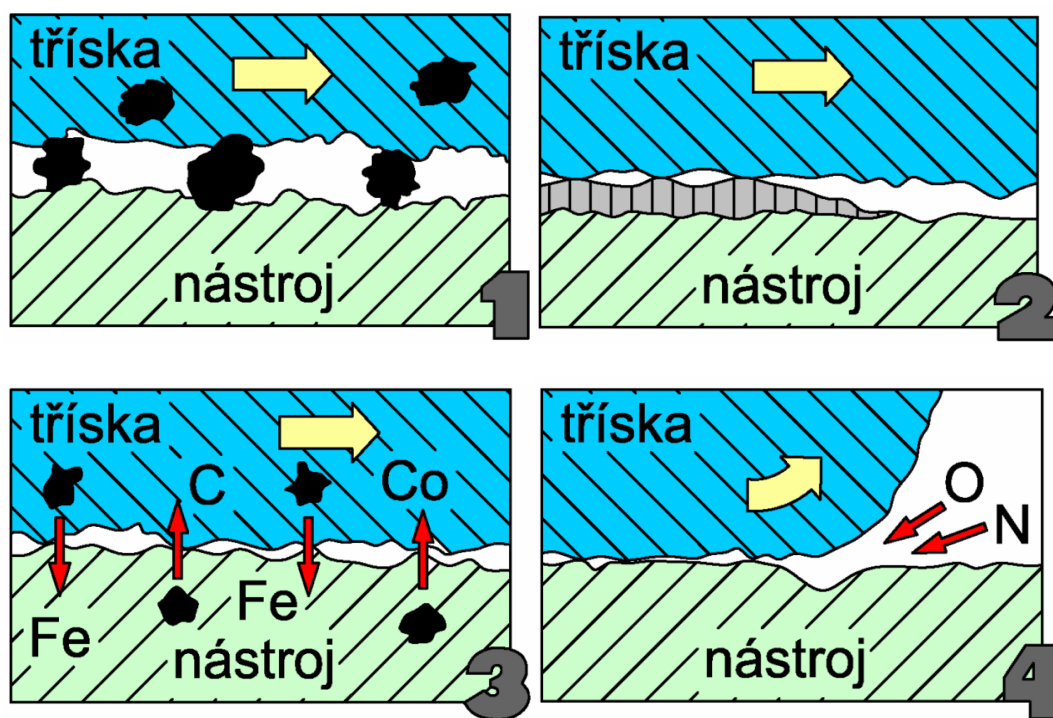
V průběhu procesu opotřebení působí mnoho odlišných fyzikálně-chemických jevů (neboli mechanismů opotřebení), k nimž zejména patří abraze, adheze, difúze, oxidace, plastická deformace a křehký lom (viz obr. 2.2) [11].



Obr. 2.2 Rozdělení mechanismů opotřebení řezných nástrojů [11].

- a) **Abrazivní otěr** (obr. 2.3, část 1) je brusný otěr, který vzniká hlavně působením tvrdých mikročástic obráběného materiálu i mikročástic uvolněných z nástroje.

- b) **Adhezní otěr** (obr. 2.3, část 2) je způsoben vznikem a následným porušením mikrosvarových spojů mezi nástrojem a obrobkem; objevuje se nejčastěji na čele nástroje a vzniká při nízkých teplotách.
- c) **Difúze** (obr. 2.3, část 3) vzniká působením chemických vlivů, kdy dochází k migraci atomů z obráběného materiálu do nástrojového a naopak. O velikosti difuzního opotřebení rozhoduje chemické složení nástrojového materiálu a materiálu obrobku.
- d) **Oxidace** (obr. 2.3, část 4) způsobuje tvorbu chemických sloučenin na povrchu nástroje při vysokých teplotách. Za přítomnosti kyslíku dochází k oxidaci nástrojového materiálu. Vzniklé oxidy působí velice rozdílně. Některé řezné nástrojové materiály jsou proto náchylnější k oxidačnímu opotřebení více než jiné.
- e) **Plastická deformace** je důsledek vysokého tepelného a mechanického zatížení, kumulovaného v čase. V nejhorším důsledku se může projevit ve formě tzv. lavinového opotřebení.
- f) **Křehký lom** je důsledek vysokého mechanického zatížení, např. přerušovaný řez, nehomogenity a vměšky v obráběném materiálu atd. [4,8,10].

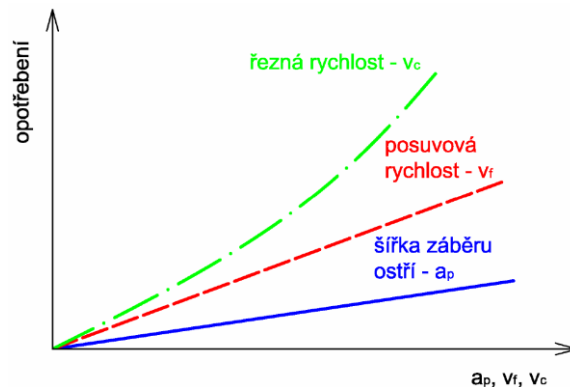


Obr. 2.3 Mechanismy opotřebení řezných nástrojů [10].  
1 – abraze, 2 – adheze, 3 – difúze, 4 – oxidace.

Z obr. 2.3 je zřejmé, že abraze, adheze, difúze a oxidace patří do tzv. plynulých mechanismů opotřebení. To znamená, že působí v průběhu času plynule, i když jejich časový okamžik začátku působení nemusí být vždy shodný. Oproti tomu

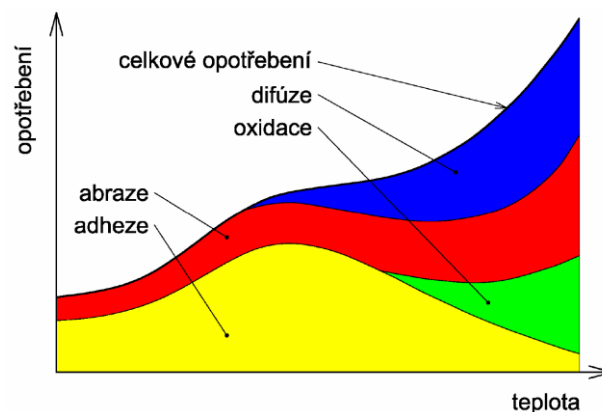
plastická deformace a křehký lom patří mezi tzv. náhlé mechanismy opotřebení, protože působí v daném okamžiku a obvykle způsobí okamžité ukončení činnosti nástroje (náhlá změna tvaru břitu nástroje, lavinové opotřebení, ulomení špičky) [11].

Hřbet nástroje se opotřebovává především v důsledku abraze a oxidace, čelo nástroje pak v důsledku adheze, difúze, abraze a oxidace. Na to, zda se nástroj bude více opotřebovávat na hřbetě či na čele, mají výrazný vliv i další faktory, jako např. geometrie nástroje, druh operace (hrubování, dokončování) a také řezné podmínky. Z řezných podmínek má pak největší vliv na opotřebení nástroje řezná rychlost, nejmenší vliv má šířka záběru ostří (obr. 2.4) [9].



Obr. 2.4 Vliv řezných podmínek na opotřebení [8].

Celkové opotřebení nástroje se pak skládá z kombinace výše uvedených mechanismů opotřebení působících současně (obr. 2.5).



Obr. 2.5 Vliv teploty na jednotlivé mechanismy opotřebení [8].

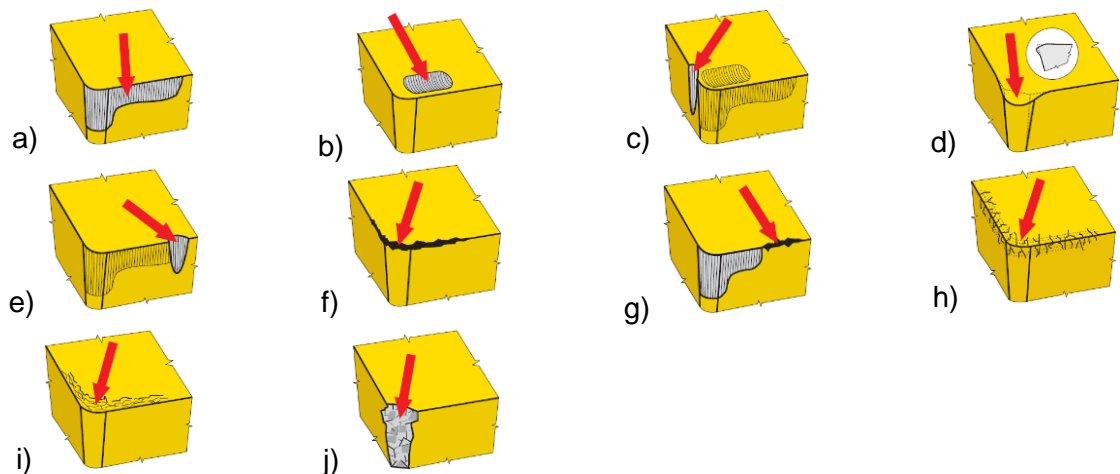
## 2.2.4 Formy opotřebení

Formy opotřebení břitu nástroje se projevují v závislosti na stanovených technologických podmínkách řezného procesu. Mezi formy opotřebení patří [10,12]:

- Opotřebení hřbetu** je jedním z hlavních kritérií charakterizujících trvanlivost VBD. Vzniká v důsledku styku nástroje a obráběného materiálu v průběhu řezného procesu.

- b) **Výmol na čele** je typ opotřebení, které se nejvýrazněji projevuje u VBD s rovným čelem, jeho výskyt není však omezen pouze na tento typ destiček. Při obrábění měkkých materiálů vzniká výmol širší a mělčí, u tvrdých materiálů naopak výmol úzký a hluboký.
- c) **Oxidační rýha na vedlejším břitu** je jedním z nejvýznamnějších kritérií limitujících životnost VBD. Setkáváme se s ní zejména u soustružení. Propojení oxidační rýhy s výmolem na čele se jednoznačně projeví na zvýšení drsnosti povrchu obrobku.
- d) **Plastická deformace špičky:** Důvodem tohoto typu opotřebení je přetížení břitu v důsledku vysokých řezných teplot (tedy vysokých rychlostí a posuvů).
- e) **Vrubové opotřebení na hlavním břitu** vzniká v oblasti styku břitu nástroje s povrchem obrobku. Je zapříčiněno převážně zpevněním povrchových vrstev obrobku a otřepy. Tento typ opotřebení se vyskytuje zejména u korozivzdorných austenitických ocelí.
- f) **Křehké porušování řezné hrany** (mikrovyštípování) se ve většině případů vyskytuje v kombinaci s jiným typem opotřebení, je samostatně obtížně identifikovatelné. Jeho příčinou bývá zejména nízká tuhost soustavy stroj–nástroj–obrobek nebo „tvrdé utváření“.
- g) **Porušování řezné hrany** (mimo záběr): Jeho příčinou je nevhodné utváření třísky, která při svém odchodu naráží na břit a ten mechanicky poškozuje.
- h) **Hřebenovité trhliny:** Tento jev je důsledkem dynamického tepelného zatížení při přerušovaném řezu.
- i) **Únavové trhliny podél hřbetu** vznikají v důsledku dynamického zatížení oblasti těsně za břitem.
- j) **Destrukce břitu resp. špičky nástroje:** Příčiny tohoto jevu jsou závislé na materiálu nástroje i materiálu obrobku, stavu a zejména tuhosti soustavy stroj–nástroj–obrobek, vliv má i velikost a typ opotřebení a záběrové podmínky.

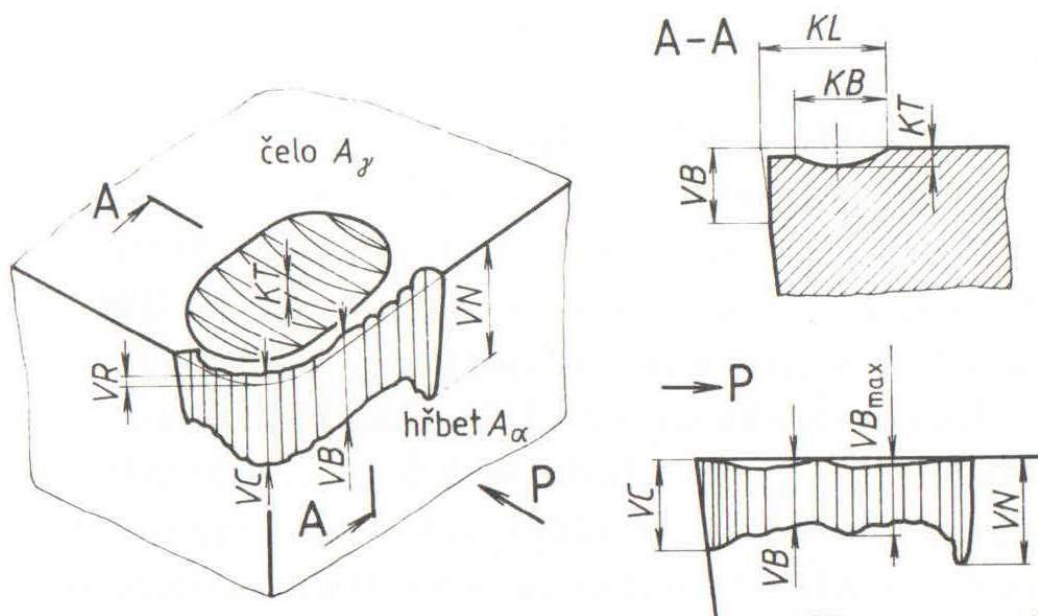
Uvedené formy opotřebení jsou graficky znázorněné na obr. 2.6.



Obr. 2.6 Formy opotřebení [12].

### 2.2.5 Průběh opotřebení

U nového nebo přestřeleného nástroje dochází po nasazení do řezného procesu k postupnému opotřebování. Opotřebení břitu, jako významný parametr řezného procesu se kvantifikuje rozměrovými charakteristikami vztaženými k postupnému opotřebování břitu řezného nástroje. Jednotlivé plochy a parametry jsou vyobrazeny na obr. 2.7 [4].



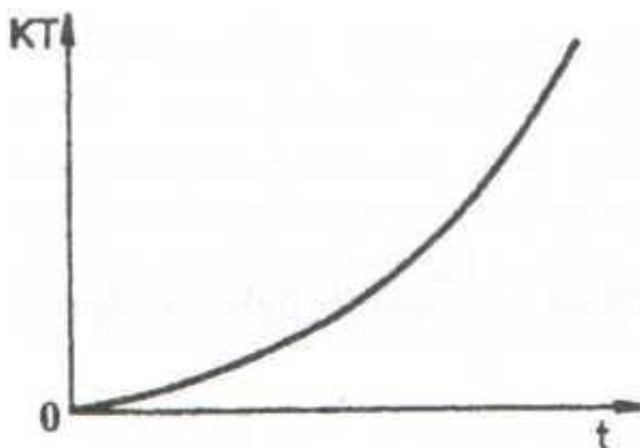
Obr. 2.7 Parametry opotřebení břitu řezného nástroje a jejich značení [4].

kde:

- VB ... opotřebení hřbetu průměrné
- VB<sub>C</sub> ... opotřebení hřbetu v oblasti špičky
- VB<sub>N</sub> ... opotřebení hřbetu vrubové
- VB<sub>max</sub> ... opotřebení hřbetu maximální
- KT ... hloubka žlábků opotřebení čela
- KB ... šířka žlábků opotřebení čela
- KM ... poloha středu žlábků opotřebení čela
- VR ... radiální opotřebení špičky

Nejčastěji se pro kvantifikaci opotřebení sleduje opotřebení hřbetu VB a hloubka žlábků opotřebení čela KT. Typický průběh  $KT=f(t)$  je na obr. 2.8. Zde je značný nárůst opotřebení způsoben přestupem tepla do nástroje, za současného zvětšování plochy styku mezi třískou a žlábkem [4,8].



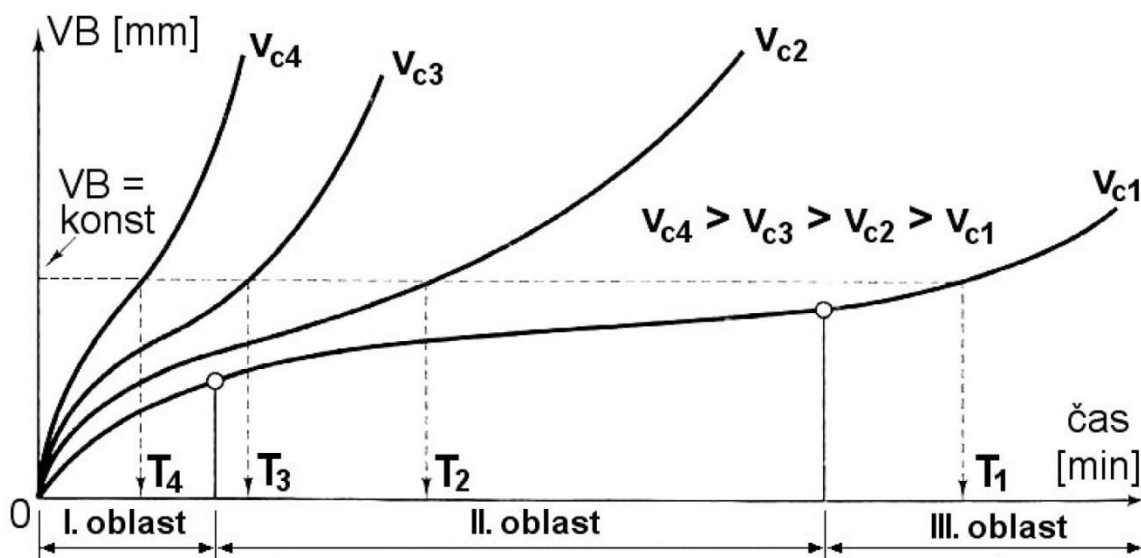
Obr. 2.8 Charakteristický průběh závislosti  $KT=f(t)$  [4].

Opotřebení hřbetu  $VB$  se mění v závislosti na řezné rychlosti a lze rozčlenit do tří oblastí (viz obr. 2.9) [8]:

I. oblast: zrychlené záběhové opotřebení – souvisí se „záběhem“ nástroje a je způsobeno vysokým měrným tlakem na vrcholcích mikronerovností povrchu hřbetu a určitou defektností povrchové vrstvy, vyvolanou podmínkami ostření (mikrotrhlíny), resp. v důsledku výrobních procesů při výrobě nástrojů.

II. oblast: lineární opotřebení s konstantní intenzitou – v této oblasti dochází k lineárnímu nárůstu opotřebení, tzn. intenzita.

III. oblast: zrychlené nadměrné opotřebení – počáteční bod této oblasti je obvykle spojen s limitní teplotou řezání a s výrazným poklesem tvrdosti řezného materiálu. Nastává zrychlené opotřebení – lavinovité opotřebení.



Obr. 2.9 Časová závislost opotřebení hřbetu pro různé řezné rychlosti [8].

### 2.2.6 Životnost nástroje

Životnost nástroje je definována jako součet všech jeho trvanlivostí nebo celková doba funkce nástroje od prvního uvedení do činnosti až do jeho vyřazení. Nástroje, které lze ostřit, se vyřazují až po odbroušení funkční části [8].

Životnost přebrušovaného nástroje vyjadřuje vztah [8]

$$Z = \sum_{i=1}^{x+1} T_i = (x + 1) \cdot T \quad (2.10)$$

kde:

- $T_i$  [min] ... jednotlivé trvanlivosti
- $T$  [min] ... aritmetický průměr hodnot  $T_i$
- $x$  [-] ... počet možných ostření nástroje

U nástroje s VBD se vyřazení provádí v případě, že byly použity všechny jejich břity. Životnost nástroje s VBD se dle [8] určí:

$$Z = \sum_{i=1}^q T_i = q \cdot T \quad (2.11)$$

kde:

- $T_i$  [min] ... trvanlivosti jednotlivých ostří destičky
- $T$  [min] ... aritmetický průměr hodnot  $T_i$
- $q$  [-] ... počet použitelných ostří destičky

### 2.2.7 Trvanlivost nástroje

Trvanlivost nástroje je součet všech čistých časů řezání, od začátku obrábění až po opotřebení břitu nástroje na předem stanovenou hodnotu vybraného kritéria (kritérium opotřebení a jeho hodnota musí být stanoveny tak, aby vyráběný obrobek měl požadovaný tvar, rozměry a kvalitu povrchu a to po celou dobu trvanlivosti nástroje). Obecně je to interval mezi nasazením nástroje do řezného procesu po vznik poruchy, která ukončí provozuschopnost nástroje [8,9].

Trvanlivost nástroje závisí zejména na metodě obrábění, vlastnostech obráběného a nástrojového materiálu a řezných podmínkách. Z řezných podmínek má na trvanlivost nástroje největší vliv řezná rychlost [8].

Závislost trvanlivosti na řezné rychlosti stanovuje Taylorův vztah [8]:

$$T = f(v_c) = C_T \cdot v_c^{-m} = \frac{C_T}{v_c^m} \quad (2.12)$$

kde:

- $C_T$  [-] ... konstanta ( $C_T = 10^8$  až  $10^{12}$ )
- $v_c$  [m·min<sup>-1</sup>] ... řezná rychlost
- $m$  [-] ... exponent



Z důvodu velikosti konstanty  $C_T$  se častěji používá tvar:

$$v_c = \frac{C_V}{T^{1/m}} \quad (2.13)$$

kde:

$C_V$  [-] ... konstanta (řádová velikost  $10^2$  až  $10^3$ )

$$C_V = C_T^{1/m} \quad (2.14)$$

Konstanta  $C_T$  závisí zejména na materiálu obrobku a nástroje. Velikost exponentu  $m$  charakterizuje především vlastnosti řezného nástroje, viz tab. 2.2 [4].

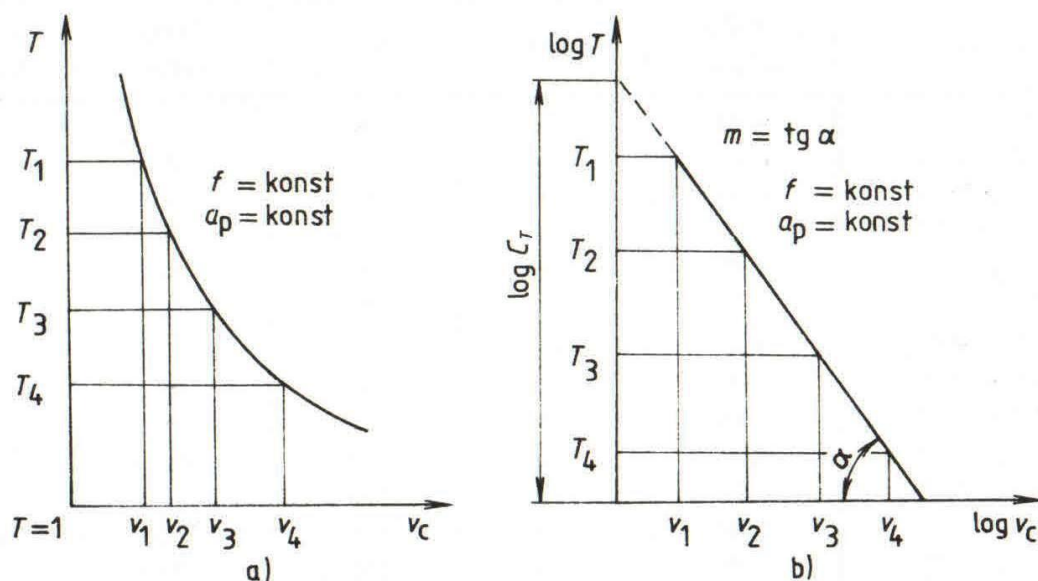
Tab. 2.2 Velikost exponentu  $m$  [9].

Řezný materiál	$m$
Nástrojové oceli	6 – 10
Rychlořezné oceli	5 – 8
Slinuté karbidy	2 – 5
Řezná keramika	1,2 – 2,5

Podmínky platnosti uvedených vztahů (2.12), (2.13) a (2.14) jsou:

- šířka záběru ostří  $a_p$  je konstantní
- posuv na otáčku  $f$  je konstantní
- opotřebení VB je konstantní
- chlazení, mazání, stav polotovaru, stroje a další jsou konstantní

Koeficienty  $m$  a  $C_T$  se obvykle určují experimentálním obráběním. To se provádí tak, že se při zvolených řezných rychlostech měří kritéria opotřebení VB nebo KT v závislosti na čase  $t$ . Zjištěné trvanlivosti  $T_1$  až  $T_4$  se pro příslušné řezné rychlosti  $v_{c1}$  až  $v_{c4}$  vynesou do diagramu s logaritmickými souřadnicemi (obr 2.10b) [13]. V diagramu (obr 2.10a) je závislost trvanlivosti na řezné rychlosti v lineárních souřadnicích.



Obr. 2.10 Závislost trvanlivosti na řezné rychlosti [4],  
a) lineární souřadnice, b) logaritmické souřadnice.

Základní Taylorův vztah může být rozšířen tak, že se bere v úvahu posuv, šířka záběru ostří pro stanovenou trvanlivost (12-15 minut u SK, 30-60 minut u RO). Takto upravený vztah pro soustružení má tvar [9]:

$$v_{cT} = \frac{C_{vT}}{a_p^{x_v} \cdot f^{y_v}} \quad (2.15)$$

kde:

$v_{cT}$ [m·min <sup>-1</sup> ]	... řezná rychlost pro stanovenou trvanlivost
$C_{vT}$ [-]	... konstanta pro stanovenou trvanlivost
$a_p$ [mm]	... šířka záběru ostří
$f$ [mm]	... posuv na otáčku
$x_v$ [-]	... exponent
$y_v$ [-]	... exponent

Upravený vztah může být dále zobecněn, že se vezme v úvahu trvanlivost, opotřebení VB a řada dalších multiplikačních konstant  $K_{vci}$  [9].

$$v_{cT} = \frac{C_{v1} \cdot VB^n}{T^{1/m} \cdot a_p^{x_v} \cdot f^{y_v}} \cdot \prod_{i=1}^n K_{vci} \quad (2.16)$$

kde:

$C_{v1}$  [-] ... konstanta

Dílčí koeficienty  $K_{vci}$  představují vliv stavu polotovaru, druhu řezu, třídy obrobitelnosti, fyzického stavu stroje, řezného prostředí, geometrie nástroje a další vlivy [9].

### 2.2.8 Náklady nástroj a jeho výměnu

Náklady pro monolitní nástroje, zahrnují cenu daného nástroje a jeho přeostrřování. V případě nástroje s VBD se jedná o náklady jednoho bříty VBD [3].

Celkové náklady na nástroj a jeho výměnu vztažené na jednu trvanlivost [3] jsou:

$$N_T = N_{Tn} + N_{Tv} \quad (2.17)$$

kde:

$N_{Tn}$  [Kč] ... náklady na provoz nástroje vztažené na jednu trvanlivost

$N_{Tv}$  [Kč] ... náklady na jednu výměnu nástroje

Náklady na provoz nástroje se vztahují na jednu trvanlivost řezného nástroje. Jsou to takové náklady, které jsou závislé na době, po kterou nástroj dokáže pracovat s danou přesností (trvanlivostí), než je potřeba jej vyměnit za nový [3,14].

#### a) Náklady celistvý nástroj

Náklady na jednu minutu provozu nástroje, který se přeostrřuje, lze dle [3] vyjádřit jako:

$$N_{1pno} = \frac{C_{pn} + z_o \cdot N_o}{z_o \cdot T} \quad (2.18)$$

kde:

$N_{1pno}$  [Kč·min<sup>-1</sup>] ... náklady na jednu minutu provozu nástroje, který se přeostrřuje

$C_{pn}$  [Kč] ... cena pořízení nástroje

$z_o$  [-] ... počet možných přeostrření nástroje

$N_o$  [Kč] ... náklady na závislé na počtu ostření nástroje

$T$  [min] ... trvanlivost nástroje

Náklady na nástroj na jednu trvanlivost pro celistvé nástroje se spočítá jako [3]:

$$N_{Tn} = \frac{C_n - C_{zn}}{z_o + 1} + t_{os} \cdot k_c \cdot \left( \frac{M_{os}}{60} + \frac{HRP_{os}}{60} \right) \cdot \frac{z_o}{z_o + 1} \quad (2.19)$$

kde:

$N_{Tn}$  [Kč] ... náklady na provoz nástroje vztažené na jednu trvanlivost bříty

$C_n$  [Kč] ... cena nástroje

$C_{zn}$  [Kč] ... zbytková cena nástroje

$z_o$  [-] ... počet možných přeostrření nástroje

$t_{os}$  [min] ... čas ostření nástroje

$k_c$  [-] ... přírůžka času směnového (obvykle 1,08 až 1,15)

$M_{os}$  [Kč] ... mzdové náklady na ostříče za hodinu

$HRP_{os}$  [Kč] ... režijní paušál ostřírny za hodinu

Po úpravě je výsledný vztah na celistvý nástroj, který se přeostrřuje [3]:

$$N_{Tn} = \frac{C_n - C_{zn}}{z_o + 1} \cdot \frac{t_{AS}}{T} \cdot \tau + t_{os} \cdot k_c \cdot \left( \frac{M_{os}}{60} + \frac{HRP_{os}}{60} \right) \cdot \frac{z_o}{z_o + 1} \quad (2.20)$$

kde:

$N_{Tn}$ [Kč]	... náklady na provoz nástroje vztažené na jednu trvanlivost břitů, při obrobení jedné součásti
$C_n$ [Kč]	... cena nástroje
$C_{zn}$ [Kč]	... zbytková cena nástroje
$z_o$ [-]	... počet možných přeostržení nástroje
$t_{AS}$ [min]	... jednotkový strojní čas
$T$ [min]	... trvanlivost nástroje
$t_{os}$ [min]	... čas ostření nástroje
$k_c$ [-]	... přírážka času směnového (obvykle 1,08 až 1,15)
$M_{os}$ [Kč]	... mzdové náklady na ostříče za hodinu
$HRP_{os}$ [Kč]	... režijní paušál ostřírny za hodinu

### b) Náklady na jednu minutu nástroje s VBD s jedním břitem

Náklady na jednu minutu provozu u nástroje, který má jeden břit, se vypočítají z ceny nové VBD a její trvanlivosti [3]:

$$N_{1pn} = \frac{C_{pn}}{T} \quad (2.21)$$

kde:

$N_{1pn}$ [Kč·min <sup>-1</sup> ]	... náklady na jednu minutu provozu nástroje
$C_{pn}$ [Kč]	... cena pořízení nástroje
$T$ [min]	... trvanlivost nástroje

Vztah pro výpočet nákladů na jednu minutu provozu nástroje, který má více břitů, je [3]:

$$N_{1pnv} = \frac{C_{pn}}{z_b \cdot T} \quad (2.22)$$

kde:

$N_{1pnv}$ [Kč·min <sup>-1</sup> ]	... náklady na jednu minutu provozu nástroje s více břitů
$C_{pn}$ [Kč]	... cena pořízení nástroje
$z_b$ [-]	... počet břitů na destičce
$T$ [min]	... trvanlivost nástroje

Náklady na nástroj s VBD se vypočítá dle vztahu [3]:

$$N_{Tn} = \frac{C_d \cdot z_d}{z_b \cdot s_b} + (1 + k_{ut}) \cdot \frac{C_{tn}}{z_u} \quad (2.23)$$

kde:

$C_d$ [Kč]	... cena břitové destičky
$z_d$ [-]	... počet břitových destiček na nástroji
$z_b$ [-]	... počet břitů na destičce
$s_b$ [-]	... součinitel využití břitových destiček
$k_{ut}$ [-]	... koeficient údržby tělesa nástroje
$C_{tn}$ [Kč]	... cena tělesa nástroje
$z_u$ [-]	... předpokládaný počet upnutí destiček za dobu životnosti tělesa nástroje

Náklady na provoz nástroje vztažených na jednu trvanlivost pro výrobu jedné součásti se vypočítá [3]:

$$N_{Tn} = \frac{C_d \cdot z_d}{z_b \cdot s_b} \cdot \frac{t_{AS}}{T} \cdot \tau + (1 + k_{ut}) \cdot \frac{C_{tn}}{z_u} \cdot \frac{t_{AS}}{T} \quad (2.24)$$

kde:

- $N_{Tn}$  [Kč/ks] ... náklady na provoz nástroje vztažené na jednu trvanlivost bříty, při obrobení jedné součásti  
 $C_d$  [Kč] ... cena břitové destičky  
 $z_d$  [-] ... počet břitových destiček na nástroji  
 $z_b$  [-] ... počet břitů na destičce  
 $s_b$  [-] ... součinitel využití břitových destiček  
 $t_{AS}$  [min] ... jednotkový strojní čas  
 $T$  [min] ... trvanlivost nástroje  
 $k_{ut}$  [-] ... koeficient údržby tělesa nástroje  
 $C_{tn}$  [Kč] ... cena tělesa nástroje  
 $z_u$  [-] ... předpokládaný počet upnutí destiček za dobu životnosti tělesa nástroje

Hodnoty konstant  $z_u$ ,  $s_b$  a  $k_{ut}$  udává následující tabulka (tab. 2.3). Jedná se o statistické údaje. Součinitel využití břitových destiček je ovlivněn technologickou kázní, poškozením nového bříty, který není v záběru odcházející třískou, křehkými lomy destiček apod. Počet upnutí je dán náhodným poškozením tělesa nástroje, koeficient údržby tělesa nástroje zahrnuje náhradní díly nástroje [3,15].

Tab. 2.3 Tabulka konstant pro vztah (2.24) [3].

Podmínky obrábění	$z_u$	$s_b$	$k_{ut}$
Lehké	400 až 600	0,95	0,05
Střední	200 až 400	0,90	0,025
Těžké	200	0,80	0,40
Velmi těžké	100	0,70	0,60

### Náklady na výměnu nástroje

Náklady na výměnu nástroje se skládají z nákladů na výměnu nástroje za minutu a času potřebného na jeho výměnu. Náklady na výměnu nástroje se také mohou vyjádřit pomocí hodinového režijního paušálu [3].

$$N_{Tv} = t_{vn} + N_{vnm} \quad (2.25)$$

kde:

- $N_{Tv}$  [Kč] ... náklady na jednu výměnu nástroje  
 $t_{vn}$  [min] ... čas na výměnu nástroje  
 $N_{vnm}$  [Kč] ... náklady na výměnu nástroje za minutu

$$N_{vnm} = k_c \cdot \left( \frac{M_s}{60} + \frac{HRP_{SP}}{60} \right) \cdot \frac{O_o}{60} \quad (2.26)$$

kde:

- $k_c$  [-] ... přírážka času směnového (obvykle 1,08 až 1,15)  
 $M_s$  [Kč] ... mzdové náklady na seřizovače za hodinu

HRP<sub>SP</sub> [Kč] ... hodinový režijní paušál (střediskových nákladů)  
 O<sub>s</sub> [Kč] ... odpis stroje za hodinu

Náklady na nástroj a jeho výměnu, které jsou závislé na trvanlivosti nástroje, se vypočítají dle vztahu [3]:

$$N_{nv} = N_T \cdot z_v \quad (2.27)$$

kde:

N<sub>T</sub> [Kč] ... náklady na břit nástroje a jeho výměnu vztažené na jednu trvanlivost  
 z<sub>v</sub> [-] ... počet výměn břitů nebo ostření nástroje

Počet výměn břitů nebo ostření nástroje, vztažený na obrobení jednoho kusu, se spočítá podle vztahu [3]:

$$z_v = \frac{t_{AS}}{T} \cdot \tau \quad (2.28)$$

$$\tau = \frac{l}{L} \quad (2.29)$$

kde:

T [min] ... trvanlivost  
 τ [-] ... poměr dráhy nástroje ve směru posuvu a délky obráběné plochy  
 l [mm] ... délka obráběné součásti  
 L [mm] ... dráha nástroje ve směru posuvu

## 2.3 Náklady na materiál

Až 50 % celkových výrobních nákladů tvoří u většiny výrobků materiálová položka a je tedy rozhodující ve struktuře výrobních nákladů. Z tohoto hlediska je důležitá otázka hospodárného využití materiálu [5,14].

Náklady na materiál vztažené na jeden polotovar se vypočítá dle vztahu [5]:

$$N_{mat} = N_m \cdot C_{mat} - z_m \cdot c_{vzš} \quad (2.30)$$

kde:

N<sub>mat</sub> [Kč] ... náklady na materiál vztažené na jeden polotovar  
 N<sub>m</sub> [kg] ... norma spotřeby materiálu  
 C<sub>mat</sub> [Kč] ... cena materiálu za kilogram  
 z<sub>m</sub> [kg] ... celkové jednotkové ztráty materiálu při výrobě součásti obráběním  
 C<sub>vzš</sub> [Kč] ... cena výkupu železného šrotu za kilogram

Normy spotřeby materiálu jsou ve výrobě podkladem k výpočtu výrobních nákladů a ke stanovení materiálně-technického zásobování. Normu spotřeby materiálu lze stanovit pomocí dvou metod. Norma spotřeby materiálu se stanoví na základě statistických záznamů o spotřebě materiálu při výrobě tvarově podobných součástek nebo s pomocí metody, která vychází z propočtu jednotlivých částí tzv. rozborově propočtová metoda [5,14].

V následující části práce je specifikovaná norma spotřeby materiálu pro výrobu polotovaru řezáním z tyče, zápustkovým kováním a litím.

### 2.3.1 Norma spotřeby materiálu z přířezu

Polotovary z tyčového materiálu (přířezy) se získávají dělením na pilách, soustruzích, frézkách a dalších zařízeních [5].

Norma spotřeby materiálu je dána součtem:

$$N_m = Q_s + z_m \quad (2.31)$$

kde:

$Q_s$  [kg] ... čistá jednotková hmotnost součástky

$z_m$  [kg] ... celkové jednotkové ztráty při výrobě součásti obráběním

Celkové ztráty při výrobě součásti obráběním jsou dány vztahem [5]:

$$z_m = q_o + q_u + q_k \quad (2.32)$$

kde:

$q_o$  [kg] ... jednotkové ztráty vzniklé obráběním polotovaru

$q_u$  [kg] ... jednotkové ztráty vzniklé dělením tyče

$q_k$  [kg] ... jednotkové ztráty vzniklé z nevyužitého konce tyče

Ztráty vzniklé obráběním jsou dány vztahem [5]:

$$q_o = Q_p + Q_o \quad (2.33)$$

kde:

$Q_p$  [kg] ... jednotková hmotnost polotovaru

$Q_o$  [kg] ... jednotková hmotnost hotové součástky

Ztráty vzniklé z konce tyče lze spočítat ze vztahu [5]:

$$q_k = \frac{Q_k}{n_p} \quad (2.34)$$

kde:

$Q_k$  [kg] ... jednotková hmotnost nevyužitého konce tyče

$n_p$  [ks] ... počet přířezů z tyčového materiálu

Počet přířezů z tyčového materiálu je celé číslo, které se počítá ze vztahu [5]:

$$n_p = \frac{L_T}{l_s + U_c} \quad (2.35)$$

kde:

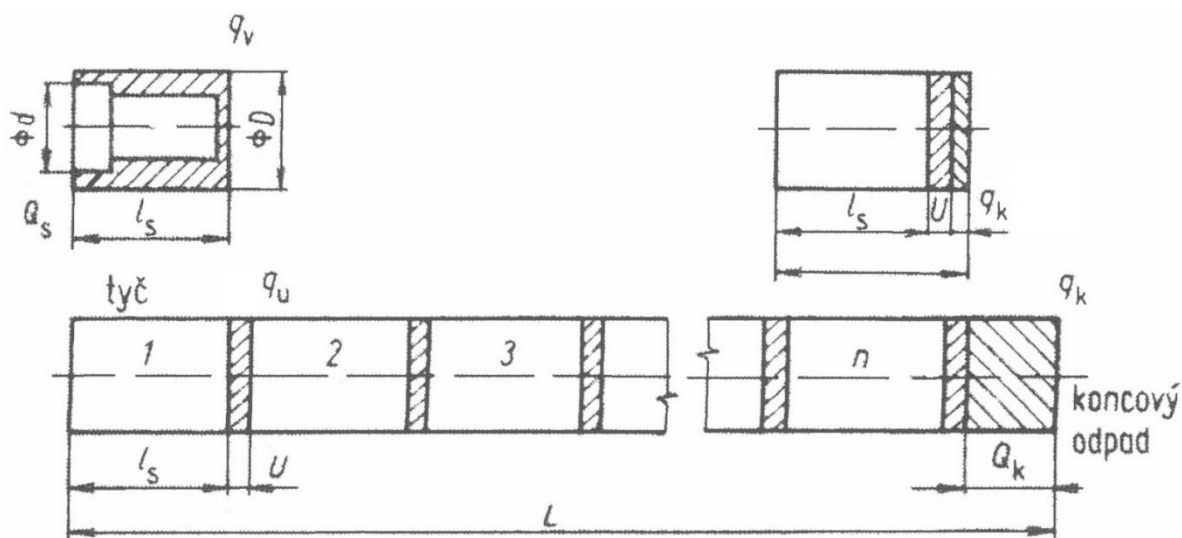
$n_p$  [ks] ... počet přířezů z tyčového materiálu

$L_T$  [mm] ... celková délka děleného tyčového materiálu

$l_s$  [mm] ... délka polotovaru

$U_c$  [mm] ... šířka řezného nástroje (šířka prořezu)

Na obr. 2.11 jsou zobrazeny ztráty materiálu při dělení tyče.



Obr. 2.11 Ztráty materiálu u polotovaru z přířezu tyče [5].

### 2.3.2 Norma spotřeby materiálu pro zápuskové výkovky

Výchozí materiál pro výkovky se získá dělením tyčí kruhového nebo obdélníkového průřezu [5].

$$Q_c = Q_v + q_{op} + q_v \quad (2.36)$$

kde:

- $Q_c$  [kg] ... hmotnost materiálu vkládaného do pece k ohřevu
- $Q_v$  [kg] ... jednotková hmotnost výkovku
- $q_{op}$  [kg] ... jednotkové ztráty opalem při ohřevu (2 až 3 %  $Q_v$ )
- $q_v$  [kg] ... jednotkový odpad materiálu z výronku

Pro ztrátu materiálu z výronku  $q_v$  platí:

- pro hmotnosti 1 až 5 kg je výronek maximálně 20 %  $Q_v$
- pro hmotnosti větší jak 5 kg je výronek maximálně 15 %  $Q_v$

Norma spotřeby materiálu výkovku se stanoví dle [5] jako:

$$N_m = Q_c + q_u + q_k \quad (2.37)$$

kde:

- $N_m$  [kg] ... norma spotřeby materiálu
- $Q_c$  [kg] ... hmotnost materiálu vkládaného do pece k ohřevu
- $q_u$  [kg] ... jednotkové ztráty vzniklé dělením tyčového materiálu
- $q_k$  [kg] ... jednotkové ztráty vzniklé z nevyužitého konce tyče



### 2.3.3 Norma spotřeby materiálu u odlitků

Při výpočtu normy spotřeby materiálů u odlitků se musí dbát na to, aby se nezapočítával vratný odpad, který ovšem do výpočtu nepatří, například vtoky, nálitky, zmetky, které se znovu použijí [5].

$$N_{mo} = Q_p + q_{prop} + q_{\xi} \quad (2.38)$$

kde:

- $N_{mo}$  [kg] ... norma spotřeby materiálu u odlitku
- $Q_p$  [kg] ... jednotková hmotnost polotovaru
- $q_{prop}$  [kg] ... jednotkové ztráty materiálu propalem
- $q_{\xi}$  [kg] ... jednotkové ztráty materiálu při broušení odlitku

### 2.3.4 Stupeň využití materiálu

Správná volba polotovaru podstatně ovlivňuje velikost výrobních nákladů při výrobě součásti. Stupeň využití materiálu při obrábění se pohybuje v rozmezí od 0,4 do 0,8. Podle tohoto stupně se posuzuje celková pracnost výrobku. Blíží-li se koeficient využití materiálu jedné, znamená to, že množství odebraných třísek je malé a tedy pracnost výrobku je malá. Obecně můžeme říci, že čím je vyšší stupeň využití materiálu, tím je nižší pracnost a vyšší produktivita při výrobě [5].

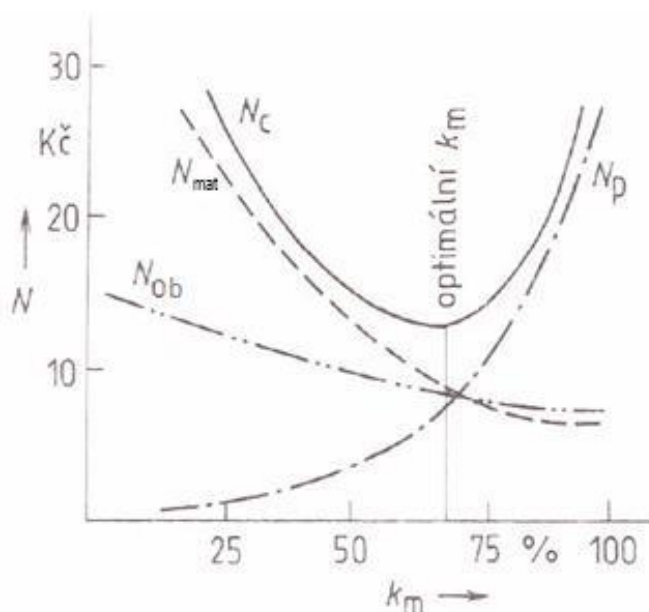
Stupeň využití materiálu se vypočítá [5]:

$$k_m = \frac{Q_s}{N_m} \quad (2.39)$$

kde:

- $k_m$  [-] ... stupeň využití materiálu
- $Q_s$  [kg] ... čistá jednotková hmotnost součásti
- $N_m$  [kg] ... norma spotřeby materiálu

Na obr. 2.12 je zobrazen vliv stupně využití materiálu na velikost výrobních nákladů. Je zde také zobrazen optimální stupeň využití materiálu a souvislost mezi stupněm využití materiálu a náklady na materiál.



Obr. 2.12 Závislost výrobních nákladů na stupni využití materiálu [5].

$N_c$  [Kč] ... celkové operační náklady  
 $N_{ob}$  [Kč] ... náklady na obrábění  
 $N_p$  [Kč] ... náklady na výrobu polotovaru  
 $N_{mat}$  [Kč] ... náklady na materiál  
 $k_m$  [-] ... stupeň využití materiálu

Pro volbu optimálního druhu polotovaru musí být splněna podmínka, že úspory na materiálu a na obrábění musí být větší nebo rovny rozdílu nákladů na stávající a nový polotovar [5].

$$(U_m + U_o) \geq (N_{pn} - N_{ps}) \quad (2.40)$$

kde:

$U_m$  [Kč] ... úspory v nákladech na materiál  
 $U_o$  [Kč] ... úspory v nákladech při obrábění polotovaru  
 $N_{pn}$  [Kč] ... náklady na zhotovení nového polotovaru  
 $N_{ps}$  [Kč] ... náklady na zhotovení stávajícího polotovaru

## 2.4 Celkové operační náklady

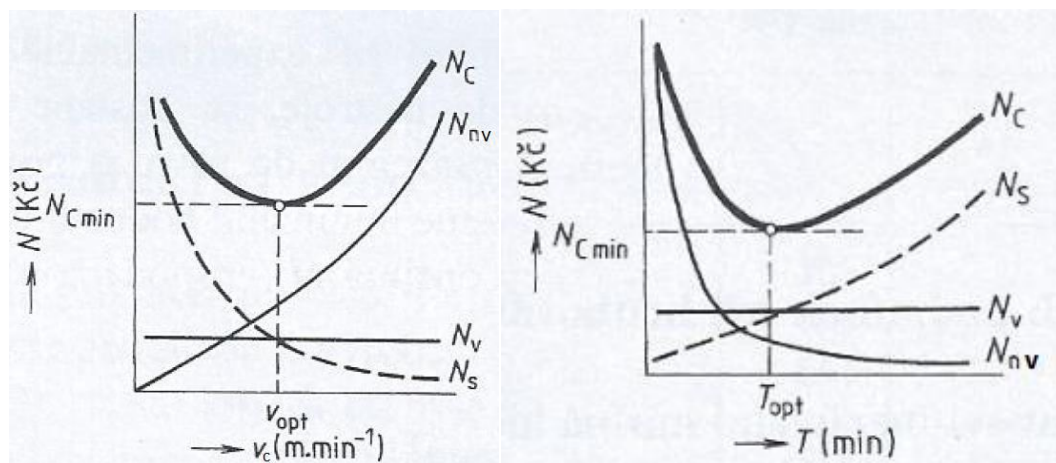
Celkové operační náklady obráběcího procesu se stanoví jako součet dílčích složek stanovených k řeznému nástroji a stroji. Slouží k řešení minimálních nákladů pro různá kritéria a získání optimálních řezných podmínek [3].

$$N_c = N_s + N_v + N_{nv} \quad (2.41)$$

kde:

$N_c$  [Kč] ... celkové operační náklady  
 $N_s$  [Kč] ... náklady na strojní práci  
 $N_v$  [Kč] ... náklady na vedlejší práci  
 $N_{nv}$  [Kč] ... náklady na nástroj a jeho výměnu vztahované na jeden kus

Na obr. 2.13 je zobrazena obecná závislost celkových operačních nákladů a jejich složek na řezné rychlosti a trvanlivosti ostří řezného nástroje. Jsou zde i vyznačeny optimální řezná rychlost a optimální trvanlivost.



Obr. 2.13 Závislost nákladů na řezné rychlosti a závislost nákladů na trvanlivosti ostří nástroje [1].

### 3 ANALÝZA OPERAČNÍCH NÁKLADŮ PRO VYBRANÉ OBRÁBĚCÍ PROCESY

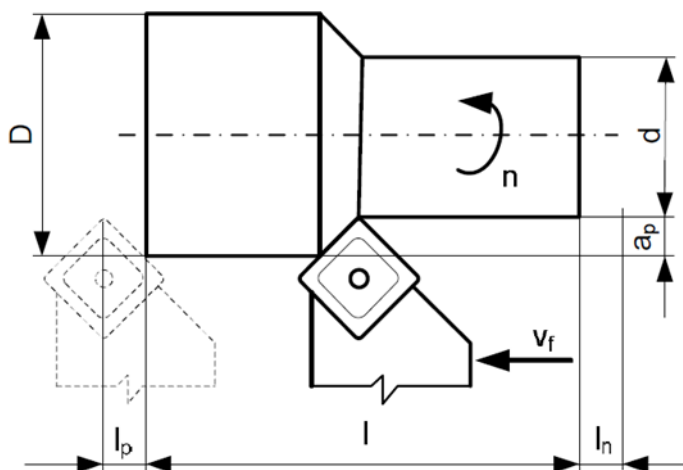
Celkové operační náklady  $N_c$  se vyjádří jako součet dílčích nákladů, viz vzorec (2.41). Zde jsou významnou složkou náklady na jednotkovou strojní práci. Ta se spočítá pomocí vzorce (2.3) [4]:

$$N_{Asp} = t_{AS} \cdot N_{sm}$$

Z tohoto vztahu je vidět, že nejdůležitější složkou je jednotkový strojní čas. Ten je různý pro každý typ operace.

V této části práce jsou konkretizovány hodnoty jednotkových strojních časů pro soustružení vnější válcové plochy, soustružení čelní plochy, frézování obvodové, frézování čelní a vrtání.

#### 3.1 Soustružení vnější válcové plochy



Obr. 3.1 Vyjádření dráhy nástroje při soustružení vnější válcové plochy [2].

Pro výpočet jednotkového strojního času válcové plochy se započítává i délka náběhu a přeběhu.

Celková dráha nástroje se dle [5] vypočítá:

$$L = l_n + l + l_p \quad (3.1)$$

kde:

- $L$  [mm] ... dráha nástroje ve směru posuvu
- $l_n$  [mm] ... délka náběhu
- $l$  [mm] ... obráběná délka
- $l_p$  [mm] ... délka přeběhu

Otáčky obrobku se vypočítají [5]:

$$n = \frac{10^3 \cdot v_c}{\pi \cdot D} \quad (3.2)$$

kde:

$n$  [ $\text{min}^{-1}$ ] ... otáčky  
 $v_c$  [ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ] ... řezná rychlost  
 $D$  [mm] ... průměr obrobku

Výpočet jednotkového strojního času při obrábění válcové plochy pro  $i$  počet odebraných třísek odpovídá vztahu [5]:

$$t_{AS} = \frac{L}{v_f} = \frac{L}{n \cdot f} \cdot i = \frac{(l_n + l + l_p) \cdot \pi \cdot D}{10^3 \cdot f \cdot v_c} \cdot i \quad (3.3)$$

kde:

$t_{AS}$  [min] ... jednotkový strojní čas  
 $D$  [mm] ... průměr obrobku  
 $i$  [-] ... počet záběrů  
 $v_f$  [ $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ] ... posuvová rychlost  
 $f$  [mm] ... posuv na otáčku

### 3.2 Soustružení čelní plochy

Soustružit čelní plochu je možné dvěma způsoby. Buď při konstantních otáčkách, nebo při konstantní řezné rychlosti. Soustruh ale musí být vybaven možností plynulé změny otáček.

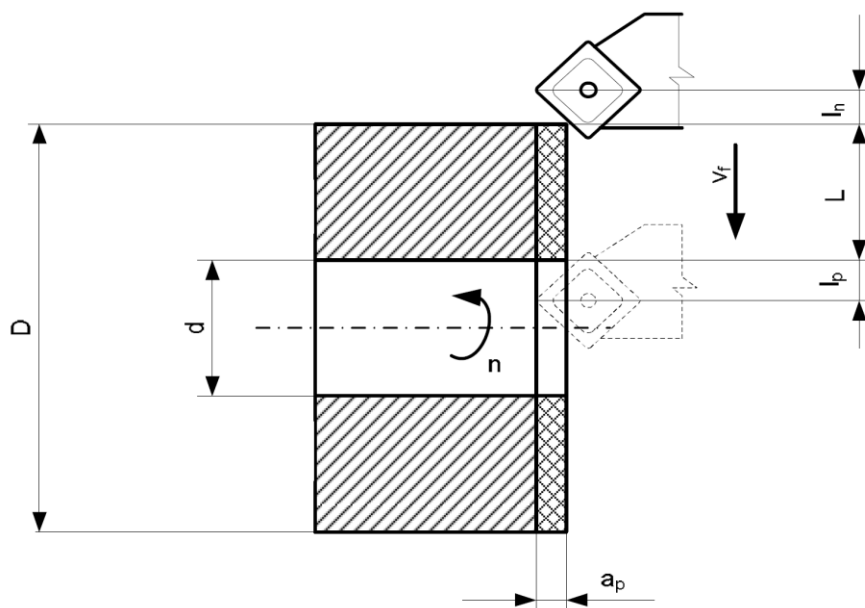
Při čelním soustružení **s konstantní frekvencí otáček** obrobku ( $n=\text{konstantní}$ ) se v závislosti na velikosti průměru mění řezná rychlost  $v_c$ . Pro  $i$  třísek (přechodů soustružnickým nožem) lze čas  $t_{AS}$  vyjádřit podle vztahu [5]:

$$t_{AS} = \frac{L}{v_f} = \frac{(l_n + l + l_p)}{n \cdot f} \cdot i = \frac{(D + 2 \cdot l_n) - (d + 2 \cdot l_p)}{2 \cdot n \cdot f} \cdot i \quad (3.4)$$

kde:

$D$  [mm] ... maximální průměr  
 $d$  [mm] ... minimální průměr

Při soustružení celého čela nebo při upichování se dosazuje za malý průměr  $d = 0$ .



Obr. 3.2 Soustružení čelní plochy [2].

V případě **konstantní řezné rychlosti** nástroj opisuje na čelní ploše obrobku Archimedovu spirálu. Tomu odpovídá jednotkový strojní čas.

Celkový čas soustružení čelní plochy se vypočítá [5]:

$$t_{ASv} = \frac{(D + 2 \cdot l_n)^2 - (d + 2 \cdot l_p)^2}{4 \cdot f \cdot 10^3 \cdot v_c} \quad (3.5)$$

Při soustružení celého čela nebo při upichování, kdy  $d = 0$ , platí vztah [5]:

$$t_{ASn} = 2 \cdot t_{ASv} \quad (3.6)$$

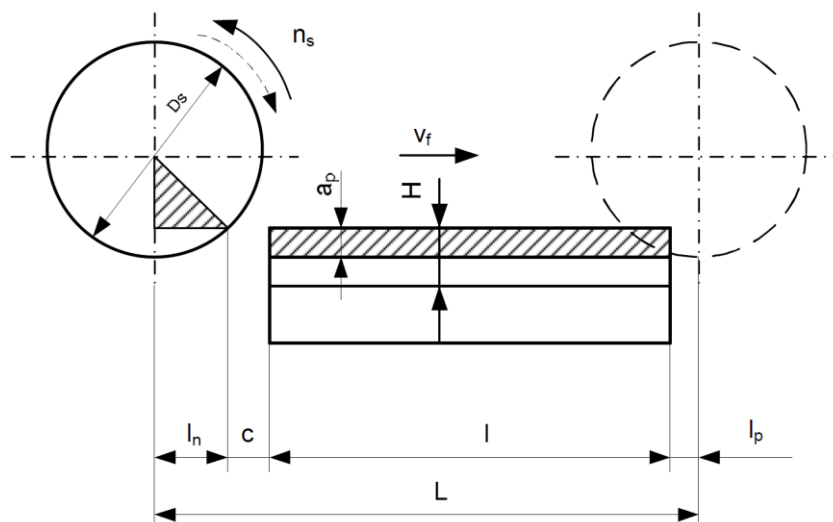
kde:

$t_{ASn}$  [min] ... jednotkový strojní čas při konstantní frekvenci otáček

$t_{ASv}$  [min] ... jednotkový strojní čas při konstantní řezné rychlosti

### 3.3 Obvodové frézování válcovou frézou

Základní druhy frézování jsou frézování obvodem nástroje a frézování čelem nástroje. Strojní čas  $t_{AS}$  je pro každý způsob frézování odlišný, což je při jeho stanovení nutno brát v úvahu [5].



Obr. 3.3 Zobrazení dráhy nástroje pro frézování obvodem [2].

Výpočet jednotkového strojního času  $t_{AS}$  a dráhy nástroje  $L$  je dán následujícími vztahy [5]:

$$t_{AS} = \frac{L}{v_f} \cdot i \quad (3.7)$$

$$v_c = \frac{\pi \cdot D_s \cdot n_{sf}}{10^3} \quad (3.8)$$

$$v_f = f_z \cdot z \cdot n_{sf} \quad (3.9)$$

$$L = l + l_n + l_p + c \quad (3.10)$$

$$l_n = \sqrt{H \cdot (D_s - H)} \quad (3.11)$$

$$i = \frac{H}{a_p} \quad (3.12)$$

Vzdálenosti přeběhu  $l_p$  a bezpečnostního náběhu  $c$  jsou 1 mm až 2 mm.

Po dosazení jednotlivých vztahů se získá výsledný vzorec pro jednotkový strojní čas obvodového frézování:

$$t_{AS} = \frac{\pi \cdot D_s \cdot (l_n + l + l_p + c)}{10^3 \cdot v_c \cdot f_z \cdot z} \cdot \frac{H}{a_p} \quad (3.13)$$

kde:

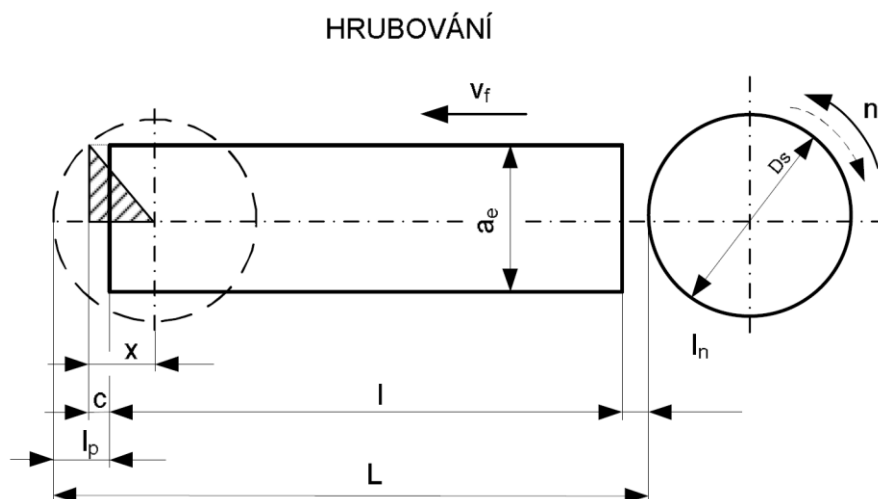
$D_s$ [mm]	... průměr frézy
$c$ [mm]	... bezpečnostní náběh 1 až 2
$v_c$ [m·min <sup>-1</sup> ]	... řezná rychlost
$f_z$ [mm]	... posuv nástroje na zub
$z$ [-]	... počet zubů frézy

$v_f$ [mm·min <sup>-1</sup> ]	... posuvová rychlost
$H$ [mm]	... celkový přídavek na obrábění
$a_p$ [mm]	... šířka záběru ostří
$n_{sf}$ [min <sup>-1</sup> ]	... frekvence otáček frézy

### 3.4 Čelní frézování válcovou frézou

Čelní frézování se ve výpočtu jednotkového strojního času  $t_{AS}$  neliší od obvodového frézování. Vztah je tedy stejný, ale mění se pouze délky náběhu  $l_n$  a přeběhu  $l_p$ . Frézování čelem nástroje je rozlišeno na souměrné a nesouměrné frézování, a také je pro výpočet času  $t_{AS}$  nutno rozlišit hrubovací a dokončovací operace. To souvisí s polohou nástroje po obrobení každé šířky záběru ostří  $a_p$ , viz následující obrázky (obr. 3.4 až 3.7). Při hrubování není potřeba přejít podél obráběné plochy celým nástrojem, což je u frézování na čisto kvůli kvalitě povrchu naopak nutností [5].

#### 3.4.1 Souměrné frézování



Obr. 3.4 Souměrné frézování čelní frézou – hrubování [2],  
kde  $a_e$  [mm] ... šířka frézované plochy.

Při souměrném frézování čelní frézou na hrubo (obr. 3.4) se pro výpočet dráhy nástroje vychází ze základního vztahu (3.1). Délka přeběhu  $l_p$  je dle [5] dána vztahem:

$$l_p = \frac{D_s}{2} - x + c = \frac{D_s}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{D_s^2 - a_e^2} + c \quad (3.14)$$

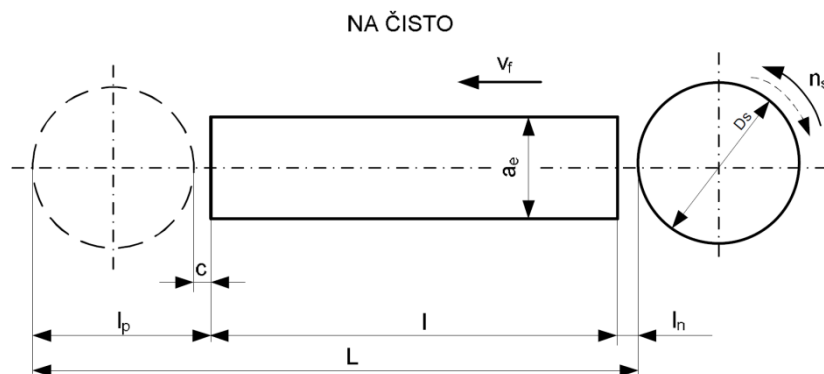
Délka náběhu  $l_n = 2$  mm až 10 mm a bezpečnostní přeběh  $c = 1$  mm až 2 mm.



Hodnota  $x$  se určí z Pythagorovy věty:

$$x = \frac{1}{2} \sqrt{D_s^2 - a_e^2} \quad (3.15)$$

Dokončování:



Obr. 3.5 Dráha nástroje ve směru posuvu při souměrném frézování čelem frézy – na čisto [2].

Jak už je uvedeno výše, při frézování na čisto je nutno frézovacím nástrojem projít celý povrch obráběné součásti (viz obr. 3.5). Je to zejména kvůli kvalitě obrobenému povrchu, kde by jinak zůstaly stopy po nástroji, jak je tomu u hrubování.

U obrábění na čisto se projíždí celá obráběná plocha, a proto se délka přeběhu vypočítá podle vztahu (3.1), kde se délka přeběhu spočítá z průměru frézy a bezpečnostního náběhu [5]:

$$l_p = D_s + c \quad (3.16)$$

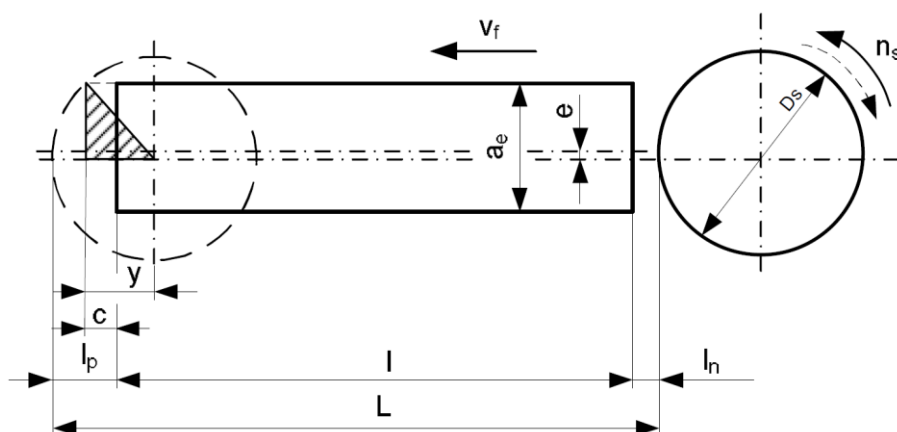
Hodnota bezpečnostního přeběhu  $c$  je totožná s hodnotou  $c$  u hrubování.

Délka náběhu se volí  $l_n = 2 \text{ mm}$  až  $10 \text{ mm}$  a bezpečnostní přeběh  $c = 1 \text{ mm}$  až  $2 \text{ mm}$ .

### 3.4.2 Nesouměrné frézování

Nesouměrné frézování se vyznačuje posunutím osy nástroje od osy obrobku o hodnotu  $e$ . Hodnoty  $c$  a  $l_n$  jsou totožné jako u frézování souměrného.

## HRUBOVÁNÍ



Obr. 3.6 Dráha nástroje pro nesouměrné frézování – hrubování [2],  
kde  $e$  ... vyosení nástroje vůči obrobku.

Pro nesouměrné frézování čelem nástroje na hrubo se pro výpočet dráhy nástroje vychází opět ze základního vztahu (3.1). Délka přeběhu  $l_p$  je dána vztahem [5]:

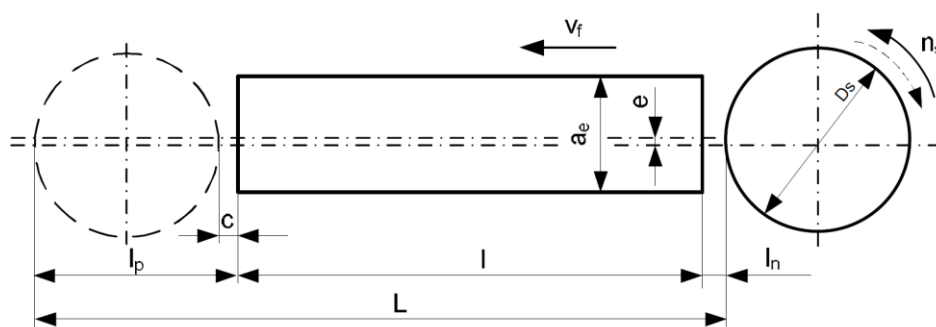
$$l_p = \frac{D_s}{2} - y + c \quad (3.17)$$

Z Pythagorovy věty se vypočítá hodnota  $y$ :

$$y = \sqrt{\frac{D_s}{4} - \left(\frac{D_s}{2} - x\right)^2} \quad (3.18)$$

Dokončování:

## NA ČISTO



Obr. 3.7 Dráhy nástroje při nesouměrném frézování čelem frézy – na čisto [2].

Délka přeběhu  $l_p$  je dána stejně jako u souměrného frézování průměrem frézy a bezpečnostním náběhem [5]:

$$l_p = D_s + c \quad (3.19)$$

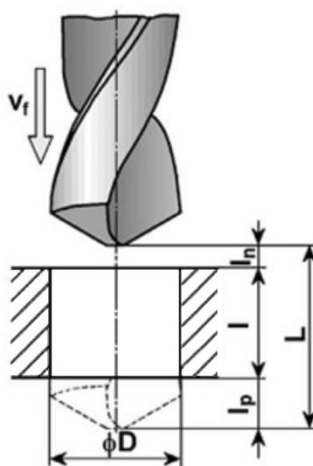
Jednotkový strojní čas pro obrobení celkového přídavku pro nesouměrné a souměrné čelní frézování je následující [5]:

$$t_{AS} = \frac{\pi \cdot D_s \cdot L}{10^3 \cdot v_c \cdot f_z \cdot z} \cdot \frac{H}{a_p} = \frac{\pi \cdot D_s \cdot (l_n + l + l_p + c)}{10^3 \cdot v_c \cdot f_z \cdot z} \cdot \frac{H}{a_p} \quad (3.20)$$

Tento vztah platí pro případ, že se povrch obrobí na jedno projetí  $a_e \leq D_s$ . Pokud je povrch obroben na více projetí, pak je potřeba tento vztah vynásobit počtem projetí  $i$ .

### 3.5 Vrtání

Dráha nástroje ve směru posuvu při vrtání šroubovitým vrtákem je zobrazeno na obr. 3.8.



Obr. 3.8 Dráha vrtáku při vrtání průchozí díry [16].

Jednotkový čas pro vrtání se určí ze vztahu [5]:

$$t_{AS} = \frac{L}{f \cdot n_s} = \frac{\pi \cdot (l_n + l + l_p)}{10^3 \cdot v_c \cdot f} \quad (3.21)$$

Délky náběhů a přeběhů se spočítají následovně [16]:

$$l_n = \frac{D}{3} \cdot \operatorname{tg} \frac{180 - \varepsilon_r}{2} \approx \frac{D}{2} \cdot \operatorname{tg} \kappa_r \quad (3.22)$$

$$l_p \approx \frac{D}{3} \quad (3.23)$$

kde:

$\varepsilon$  ... úhel špičky ostří

$\kappa$  ... úhel nastavení hlavního ostří

## 4 OPERAČNÍ NÁKLADY OBRÁBĚCÍHO PROCESU JAKO KRITÉRIUM JEHO OPTIMALIZACE

Optimalizaci můžeme rozdělit na dva základní druhy – konvenční a adaptivní. Konvenční optimalizace je provedena ještě před realizací výroby, zatímco adaptivní optimalizace probíhá přímo při výrobě. Adaptivní optimalizace využívá aktuálních záznamů ze snímačů umístěných na stroji nebo nástroji, který je právě v provozu. Optimalizaci zde provádí adaptivní řídicí systém na základě informací o současném stavu řezného procesu, případně o výsledku určité části řezného procesu. Tyto získané informace adaptivní řídicí systém okamžitě zpracuje, určí optimální řezné podmínky a stroj je ihned realizuje. Oba typy optimalizací jsou v podstatě stejné a vycházejí z omezujících podmínek a z kritéria optimálnosti. Jejich matematické formulace jsou v principu totožné [3].

Optimalizace obráběcího procesu pak může být provedena z hledisek následujících kritérií optimálnosti:

- minimální výrobní náklady,
- maximální výrobnosti (produktivity),
- maximální úběr materiálu,
- maximální zisk,
- vícekritériální optimalizace.

V následujícím textu je optimalizace provedena pro kritérium minimálních výrobních nákladů a pro kritérium maximální výrobnosti.

### 4.1 Optimalizace trvanlivosti břitu pro kritérium minimálních operačních nákladů

Toto je základní kritérium optimalizace obráběcího procesu. V případě, že se nevyskytne závažný důvod pro uvažování jiného kritéria, je toto kritérium v dnešní době nejpodstatnější. Toto kritérium a jeho matematická formulace nám udává způsob optimalizace, jejímž cílem je dosažení minimálních výrobních nákladů [3].

Vychází se ze základního vztahu pro celkové operační výrobní náklady na obrobek jednoho kusu (2.41). Náklady na strojní práci  $N_s$  se vypočítají jako [4]:

$$N_s = K_{TN1} \cdot T^{\frac{1}{m}} \quad (4.1)$$

Pro náklady na nástroj a jeho výměnu platí vztah [4,17]:

$$N_{nV} = K_{TN2} \cdot T^{\left(\frac{1}{m}-1\right)} \quad (4.2)$$

Konstanty  $K_{TN1}$  a  $K_{TN2}$  se určí ze vztahu pro podélné soustružení válcové plochy:

$$K_{TN1} = \frac{\pi \cdot D \cdot L \cdot N_{sm}}{10^3 \cdot f \cdot C_T^{1/m}} \quad (4.3)$$

$$K_{TN2} = \frac{\pi \cdot D \cdot L \cdot \tau}{10^3 \cdot f \cdot C_T^{1/m}} \quad (4.4)$$

kde:

- D [mm] ... průměr obráběné plochy
- L [mm] ... dráha nástroje ve směru posuvu
- $N_{sm}$  [Kč] ... náklady na minutu strojní práce
- f [mm] ... posuv na otáčku
- m ... exponent z Taylorova vztahu
- $\tau$  [-] ... poměr dráhy nástroje ve směru posuvu a délky obráběné plochy
- $\tau = l/L$

Dosazením složek  $N_s$  a  $N_{nv}$  do základního vztahu (2.41) získáme vztah:

$$N_c = f(T) = K_{TN1} \cdot T^{\left(\frac{1}{m}\right)} + N_V + N_T \cdot K_{TN2} \cdot T^{\left(\frac{1}{m}-1\right)} \quad (4.5)$$

Optimální trvanlivost řezného nástroje pro kritérium minimálních nákladů se vypočítá derivací podle proměnné T a položením dané derivace rovno nule:

$$\frac{dN_c}{dT} = K_{TN1} \cdot \frac{1}{m} \cdot T^{\left(\frac{1}{m}-1\right)} + 0 + N_T \cdot K_{TN2} \cdot \left(\frac{1}{m} - 1\right) \cdot T^{\left(\frac{1}{m}-2\right)} = 0 \quad (4.6)$$

Po úpravě a dosazení konstant je optimální trvanlivost řezného nástroje pro kritérium minimálních nákladů [4]:

$$T_{optN} = \frac{\tau \cdot N_T}{N_{sm}} \cdot (m - 1) \quad (4.7)$$

kde:

- m [-] ... exponent z Taylorova vztahu
- $\tau$  [-] ... poměr dráhy nástroje ve směru posuvu a délky obráběné plochy
- $N_T$  [Kč] ... náklady na nástroj a jeho výměnu vztažené na jednu trvanlivost
- $N_{sm}$  [Kč] ... náklady na minutu strojní práce

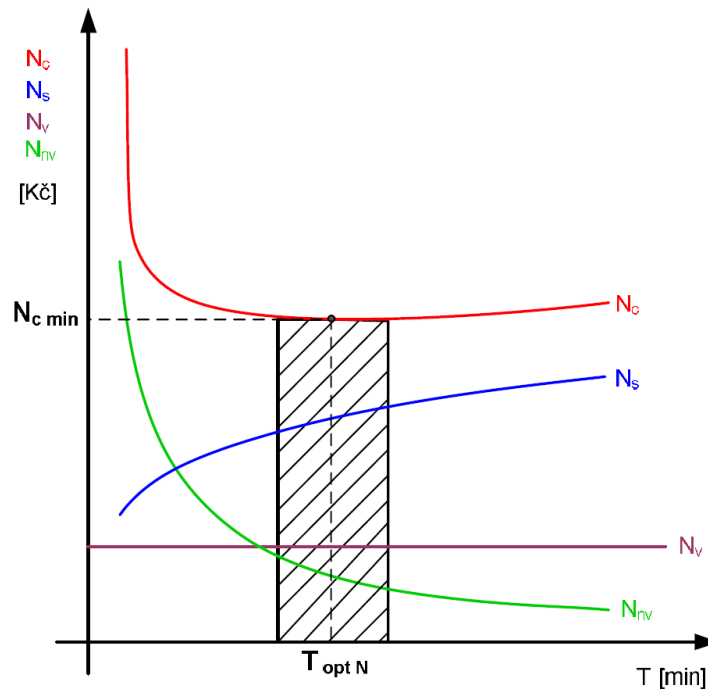
Někdy se vyjadřuje ve formálně upraveném vztahu pomocí nákladů na jednu hodinu strojní práce.

$$T_{optN} = \frac{60 \cdot \tau \cdot N_T}{N_{hs}} \cdot (m - 1) \quad (4.8)$$

kde:

- $N_T$  [Kč] ... náklady na nástroj a jeho výměnu vztažené na jednu trvanlivost
- $\tau$  [-] ... poměr dráhy nástroje ve směru posuvu a délky obráběné plochy
- m [-] ... exponent z Taylorova vztahu
- $N_{hs}$  [Kč] ... náklady na provoz stroje za hodinu

Závislost celkových operačních výrobních nákladů a jejich jednotlivých složek na trvanlivosti je na obr. 4.1. Je zde také vyznačena oblast optimální trvanlivosti  $T_{optN}$ .



Obr. 4.1 Průběh operačních nákladů v závislosti na trvanlivosti  $T$  [2].

## 4.2 Optimalizace řezné rychlosti pro kritérium minimálních operačních nákladů

Při optimalizaci řezné rychlosti se také vychází ze základního vztahu pro celkové operační výrobní náklady na obrobení jednoho kusu (2.41). Náklady na strojní práci  $N_s$  se vypočítají jako [4]:

$$N_s = K_1 \cdot v_c^{-1} \quad (4.9)$$

Náklady na nástroj a jeho výměnu se vypočítají:

$$N_{nv} = K_2 \cdot v_c^{m-1} \quad (4.10)$$

Konstanty  $K_{TN1}$  a  $K_{TN2}$  se určí ze vztahu pro podélné soustružení válcové plochy:

$$K_1 = \frac{\pi \cdot D \cdot L \cdot N_{sm}}{10^3 \cdot f} \quad (4.11)$$

$$K_2 = \frac{\pi \cdot D \cdot L \cdot \tau \cdot N_T}{10^3 \cdot f \cdot C_T} \quad (4.12)$$

Dosazením složek  $N_s$  a  $N_{nv}$  do základního vztahu (2.41) získáme vztah:

$$N_c = f(v_c) = K_1 \cdot v_c^{-1} + N_v + K_2 \cdot v_c^{(m-1)} \quad (4.13)$$

Optimální řezná rychlost pro kritérium minimálních nákladů se vypočítá derivací podle proměnné  $v_c$  a položením dané derivace rovno nule:

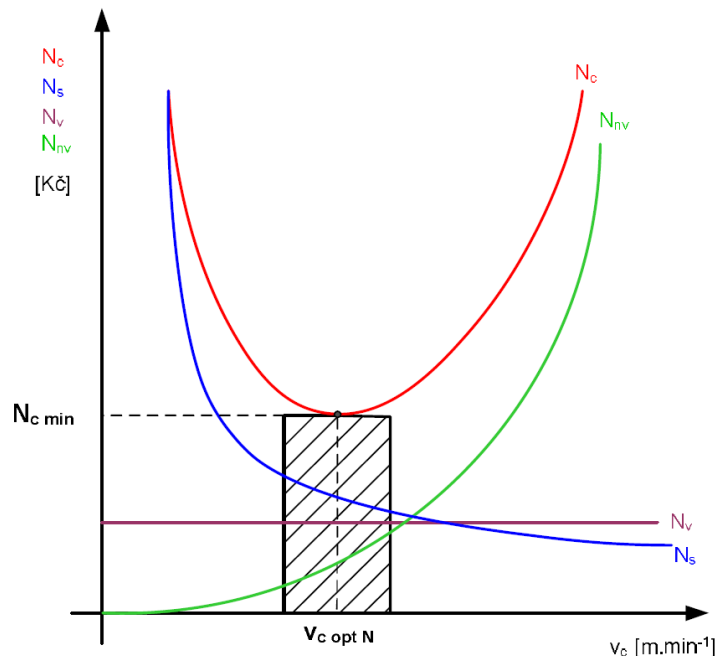
$$\frac{dN_c}{dv_c} = -K_1 \cdot v_c^{-2} + 0 + (m-1) \cdot K_2 \cdot v_c^{(m-2)} = 0 \quad (4.14)$$

Po úpravě a dosazení konstant je optimální řezná rychlost pro kritérium minimálních nákladů pro soustružení vnější válcové plochy [4]:

$$v_c = \left[ \frac{K_1}{K_2 \cdot (m-1)} \right]^{\frac{1}{m}} \quad (4.15)$$

$$v_{c \text{ opt } N} = \left[ \frac{C_T \cdot N_{sm}}{\tau \cdot N_T \cdot (m-1)} \right]^{\frac{1}{m}} \quad (4.16)$$

Závislost celkových operačních výrobních nákladů a jejich jednotlivých složek na řezné rychlosti je na obr. 4.2. Je zde vyznačena i oblast optimální řezné rychlosti  $v_{c \text{ opt } N}$ . Z grafu je zřejmé, že celkové operační náklady jsou součtem jednotlivých složek.



Obr. 4.2 Průběh operačních nákladů v závislosti na řezné rychlosti [2].



### 4.3 Optimalizace trvanlivosti břitu pro kritérium maximální výrobnosti

Toto kritérium nahlíží na proces optimalizace tak, aby bylo dosaženo maximálně možného vyrobeného množství. Neuvažuje už ale aspekt nákladů. Toto kritérium je pro podnik z ekonomického hlediska dlouhodobě neudržitelné [3].

Maximální výrobnost koresponduje s minimální hodnotou operačního času jednotkové práce, který se v daném případě vyjádří jako součet základních složek [4]:

$$t_{Ao} = t_{AS} + t_{AV} + \frac{t_{AX}}{Q_T} \quad (4.17)$$

kde:

- $t_{Ao}$  [min] ... operační čas jednotkové práce
- $t_{AS}$  [min] ... jednotkový strojní čas
- $t_{AV}$  [min] ... jednotkový vedlejší čas
- $t_{AX}$  [min] ... čas jednotkové nepravidelné obsluhy
- $Q_T$  [-] ... počet kusů obrobků za jednu trvanlivost nástroje

Obecně se velikost operačního času vyjádří ve tvaru [4]:

$$t_{Ao} = f(T) = K_{TV} \cdot T^{\frac{1}{m}} + t_{AV} + K_{TV} \cdot \tau \cdot t_{AX} \cdot T^{\left(\frac{1}{m}-1\right)} \quad (4.18)$$

Konstanta  $K_{TV}$  pro podélné soustružení válcové plochy (kde  $D$  a  $L$  jsou charakteristické rozměry) lze vyjádřit jako [4,18]:

$$K_{TV} = \frac{\pi \cdot D \cdot L}{10^3 \cdot f \cdot c_T^{\frac{1}{m}}} \quad (4.19)$$

Optimální trvanlivost břitu nástroje pro kritérium maximální výrobnosti vychází ze vztahu (4.17). Tento vztah se vyjádří jako funkce trvanlivosti  $T$  (viz vztah (4.18)), provede se matematická operace derivace a položí se rovno nule. Jednotkový vedlejší čas se chová při derivaci jako konstanta, proto je roven nule.

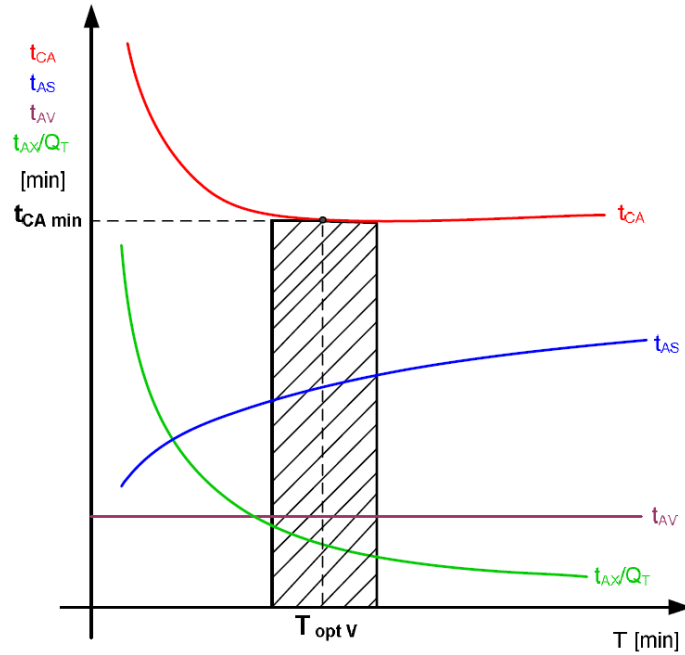
$$\frac{dt_{Ao}}{dT} = \frac{1}{m} \cdot K_{TV} \cdot T^{\left(\frac{1}{m}-1\right)} + 0 + \left(\frac{1}{m-1}\right) \cdot K_{TV} \cdot \tau \cdot t_{AX} \cdot T^{\left(\frac{1}{m}-2\right)} = 0 \quad (4.20)$$

Odtud se vyjádří vztah pro optimální trvanlivost při maximální výrobnosti.

$$T_{opt V} = \tau \cdot t_{AX} \cdot (m - 1) \quad (4.21)$$

kde:

- $m$  [-] ... exponent z Taylorova vztahu
- $\tau$  ... poměr dráhy nástroje ve směru posuvu a délky obráběné plochy
- $t_{AX}$  [min] ... čas jednotkové nepravidelné obsluhy



Obr. 4.3 Obecný průběh časů  $t_{CA}$ ,  $t_{AS}$ ,  $t_{AV}$ ,  $t_{AX}/Q_T$  v závislosti na trvanlivosti  $T$  [2].

#### 4.4 Optimalizace řezné rychlosti pro kritérium maximální výrobnosti

Stejně jako u optimalizace trvanlivosti se vychází ze základního vztahu (4.17). Obecně se velikost operačního času vyjádří po úpravě pro derivaci [4]:

$$t_{Ao} = f(v_c) = K_3 \cdot v_c^{-1} + K_4 \cdot v_c^{(m-1)} + t_v \quad (4.22)$$

Konstanty  $K_3$  a  $K_4$  jsou pro soustružení válcové plochy [4,18]:

$$K_3 = \frac{\pi \cdot D \cdot L}{f \cdot 10^3} \quad (4.23)$$

$$K_4 = \frac{\tau \cdot L \cdot \pi \cdot D \cdot t_{AX}}{10^3 \cdot v_c \cdot f \cdot C_T} \quad (4.24)$$

Po derivaci vztahu (4.22), položení rovno nule a úpravě získáme obecnou optimální řeznou rychlost pro kritérium maximální výrobnosti:

$$\frac{dt_{Ao}}{dv_c} = -K_3 v_c^{-2} + K_4 \cdot (m-1) \cdot v_c^{(m-2)} + 0 = 0 \quad (4.25)$$

$$K_3 = (m-1) \cdot K_4 \cdot v_c^m \quad (4.26)$$

$$v_{c \text{ opt } V} = \left[ \frac{K_3}{K_4 \cdot (m - 1)} \right]^{\frac{1}{m}} \quad (4.27)$$

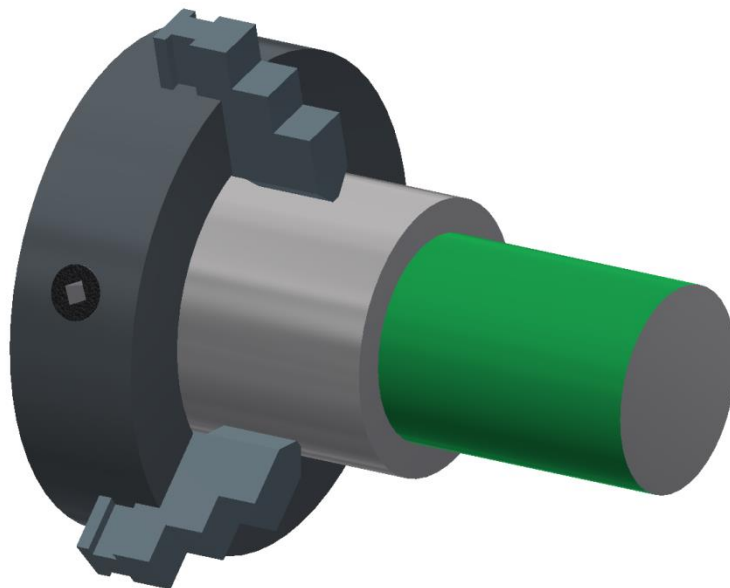
Optimální řezná rychlost pro kritérium maximální výrobnosti se vypočítá dle vztahu [4]:

$$v_{c \text{ opt } V} = \left[ \frac{C_T}{\tau \cdot t_{AX} \cdot (m - 1)} \right]^{\frac{1}{m}} \quad (4.28)$$

Ze vztahu (4.28) je zřejmé, že optimální řezná rychlost pro kritérium maximální výrobnosti závisí nejvíce na materiálu nástroje a jednotkovém čase nepravidelné obsluhy.

#### 4.5 Příklady optimalizace pro soustružení vnější válcové plochy

V této kapitole je provedena optimalizace při soustružení vnější válcové plochy u zvolené součásti na obr. 4.4. Provádí se optimalizace pro kritérium minimálních nákladů a kritérium maximální výrobnosti.



Obr. 4.4 Soustružená válcová plocha zvolené součásti.

##### ZADÁNÍ:

- průměr  $D = 65 \text{ mm}$  a délce  $l = 120 \text{ mm}$
- materiál obrobku 12 050.1
- šířka záběru ostří  $a_p = 0,2 \text{ mm}$
- posuv na otáčku  $f = 0,12 \text{ mm}$

- délka náběhu a přeběhu  $l_n = l_p = 3 \text{ mm}$
- čas jednotkové vedlejší práce  $t_{AVp} = 3 \text{ min}$
- jednotkový čas nepravidelné obsluhy  $t_{AX} = t_{A102} = 2 \text{ min}$
- exponent  $m$  z Taylorova vztahu  $m = 4,34$
- konstanta  $C_v$  z Taylorova vztahu  $C_v = 458$
- náklady na hodinu provozu stroje  $N_{hs} = 840 \text{ Kč}$
- náklady na minutu vedlejší práce  $N_{vm} = 5 \text{ Kč}$
- náklady na výměnu nástroje za minutu  $N_{vnm} = 5 \text{ Kč}$

**Použitá VBD:** WNMG 080408 NLU (SUMITOMO AC810P)

- cena VBD  $C_d = 235 \text{ Kč}$
- počet břitů na destičce  $z_b = 6$
- součinitel využití VBD  $s_b = 0,9$

#### **PŘEDPOKLADY:**

- pro obrábění se použije CNC obráběcí centrum
- neuvažuje se cena držáku
- soustruží se konstantní řeznou rychlostí
- při výpočtu se neuvažuje cena držáku nástroje
- soustruží se na jeden průjezd  $i = 1$

#### **4.5.1 Optimalizace pro kritérium minimálních operačních nákladů**

V této části se provedou výpočty za účelem nalezení nejvhodnější kombinace řezné rychlosti a trvanlivosti. Zjišťujeme optimální řeznou rychlost, optimální trvanlivost a jednotkový strojní čas abychom našli nejnižší hodnotu operačních nákladů.

##### **Stanovení optimální řezné rychlosti**

Náklady na VBD lze spočítat podle vztahu (2.23):

$$N_{Tn} = \frac{C_d \cdot z_d}{z_b \cdot s_b} = \frac{235 \cdot 1}{6 \cdot 0,9} = 43,52 \text{ Kč}$$

Náklady na výměnu nástroje se počítají dle vztahu (2.25):

$$N_{Tv} = t_{vn} \cdot N_{vnm} = t_{AX} \cdot N_{vnm} = 2 \cdot 5 = 10 \text{ Kč}$$

Výpočet nákladů na břit nástroje a jeho výměnu vztažené na jednu trvanlivost lze spočítat dle vzorce (2.17):

$$N_T = N_{Tn} + N_{Tv} = 43,52 + 10 = 53,52 \text{ Kč}$$

Poměr dráhy nástroje ve směru posuvu a délky obráběné plochy pro vnější válcové soustružení lze vypočítat dle (2.29):

$$\tau = \frac{l}{L} = \frac{l}{l_n + l + l_p} = \frac{120}{3 + 120 + 3} = 0,952$$

Optimální řezná rychlost pro soustružení vnější válcové plochy pro kritérium minimálních operačních nákladů se vypočítá podle vzorce (4.16):

$$v_{c \text{ opt } N} = \left[ \frac{C_T \cdot N_{sm}}{\tau \cdot N_T \cdot (m - 1)} \right]^{\frac{1}{m}} = \left[ \frac{3,53 \cdot 10^{11} \cdot \frac{840}{60}}{0,952 \cdot 53,52 \cdot (4,34 - 1)} \right]^{\frac{1}{4,34}} = 257,56 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$$

Otáčky stroje pro optimální řeznou rychlost se vypočítají podle vztahu (3.2):

$$n_{opt N} = \frac{10^3 \cdot v_{c \text{ opt } N}}{\pi \cdot D} = \frac{10^3 \cdot 257,56}{\pi \cdot 65} = 1261,3 \text{ min}^{-1}$$

Trvanlivost řezného nástroje pro řeznou rychlost  $330 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  se vypočítá podle vztahu (2.12):

$$T = \frac{c_T}{v_c^m} = \frac{3,5331 \cdot 10^{11}}{330^{4,34}} = 4,148 \text{ min}$$

Optimální trvanlivost řezného nástroje pro soustružení vnější válcové plochy pro kritérium minimálních operačních nákladů se vypočítá dle (4.8):

$$T_{opt N} = \frac{60 \cdot \tau \cdot N_T}{N_{hs}} \cdot (m - 1) = \frac{60 \cdot 0,952 \cdot 53,52}{840} \cdot (4,34 - 1) = 12,16 \text{ min}$$

Jednotkový strojní čas pro optimální řeznou rychlost se vypočítá dle (3.3):

$$t_{AS \text{ opt } N} = \frac{L}{v_f} = \frac{(l_n + l + l_p) \cdot \pi \cdot D \cdot i}{10^3 \cdot f \cdot v_{c \text{ opt } N}} = \frac{(3 + 120 + 3) \cdot \pi \cdot 65 \cdot 1}{10^3 \cdot 0,12 \cdot 257,56} = 0,8325 \text{ min}$$

### Výpočet operačních nákladů

Náklady na jednotkovou strojní práci dle (2.3) jsou:

$$N_{ASp} = t_{AS} \cdot N_{sm} = 0,8325 \cdot 14 = 11,65 \text{ Kč}$$

Náklady na jednotkovou vedlejší práci se vypočítají dle (2.8):

$$N_{AVp} = t_{AVp} \cdot N_{vm} = 3 \cdot 5 = 15 \text{ Kč}$$

Počet výměn břitů nástroje na obrobení jednoho kusu dle (2.28) je:

$$z_v = \frac{t_{AS \text{ opt } N}}{T_{\text{opt } N}} \cdot \tau = \frac{0,8325}{12,16} \cdot 0,952 = 0,0652$$

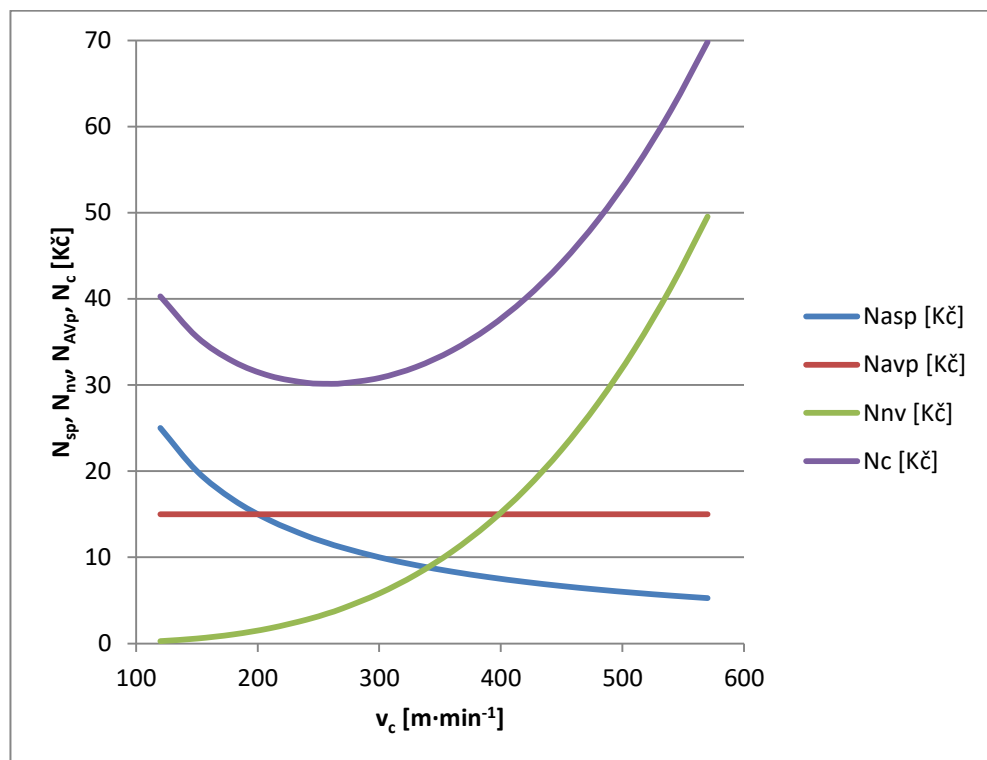
Náklady na nástroj a jeho výměnu se spočítají podle vzorce (2.27):

$$N_{nv} = N_T \cdot z_v = 53,52 \cdot 0,0652 = 3,49 \text{ Kč}$$

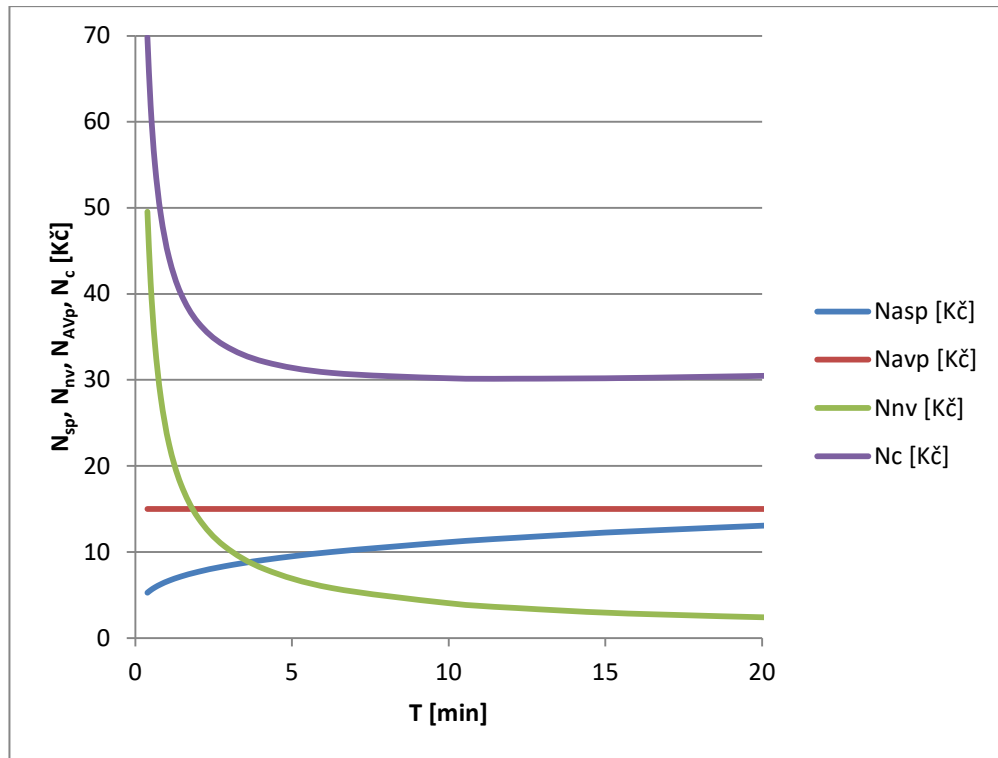
Celkové operační náklady pro kritérium minimálních operačních nákladů se vypočítají podle vztahu (2.41):

$$N_c = N_{Asp} + N_{Avp} + N_{nv} = 11,65 + 15 + 3,49 = 30,14 \text{ Kč/ks}$$

Při soustružení vnější válcové plochy podle kritéria minimálních nákladů je optimální řezná rychlost  $257,56 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  a optimální trvanlivost 12,16 min. Z grafů (obr. 4.5 a 4.6) je zřejmé, že vypočtené hodnoty jsou skutečně optimální pro dosažení minimálních operačních nákladů, které činí 30,14 Kč/ks. Toto potvrzuje i tabulka závislosti operačních nákladů a trvanlivosti na řezné rychlosti, uvedená v příloze 2.



Obr. 4.5 Průběh operačních nákladů v závislosti na řezné rychlosti



Obr. 4.6 Průběh operačních nákladů v závislosti na trvanlivosti.

#### 4.5.2 Optimalizace pro kritérium maximální výrobnosti

V této části je cílem nalezení nejvhodnější kombinace řezné rychlosti a trvanlivosti tak, aby zadaná součást byla vyrobena co nejrychleji. To znamená i nalezení minimální hodnoty operačního času pro splnění podmínky maximální výrobnosti.

##### Stanovení optimální řezné rychlosti

Optimální řezná rychlost pro kritérium maximální výrobnosti dle (4.28) je:

$$v_{c \text{ opt } V} = \left[ \frac{C_T}{\tau \cdot t_{AX} \cdot (m - 1)} \right]^{\frac{1}{m}} = \left[ \frac{3,53 \cdot 10^{11}}{0,952 \cdot 2 \cdot (4,34 - 1)} \right]^{\frac{1}{4,34}} = 299,02 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$$

Otáčky stroje pro optimální řeznou rychlost se vypočítají dle vztahu (3.2):

$$n_{\text{opt } V} = \frac{v_{c \text{ opt } V} \cdot 10^3}{\pi \cdot D} = \frac{299,02 \cdot 10^3}{\pi \cdot 65} = 1464,35 \text{ min}^{-1}$$

Optimální trvanlivost pro kritérium maximální výrobnosti se vypočítá dle (4.21):

$$T_{\text{opt } V} = \tau \cdot t_{AX} \cdot (m - 1) = 0,952 \cdot 2 \cdot (4,34 - 1) = 6,362 \text{ min}$$

Jednotkový strojní čas pro optimální řeznou rychlost se vypočítá dle (3.3):

$$t_{AS\ opt\ V} = \frac{L}{v_f} = \frac{(l_n + l + l_p) \cdot \pi \cdot D \cdot i}{10^3 \cdot f \cdot v_{c\ opt\ V}} = \frac{(3 + 120 + 3) \cdot \pi \cdot 65 \cdot 1}{10^3 \cdot 0,12 \cdot 299,02} = 0,717\ min$$

Relativní dráha nástroje vůči obrobku ve směru posuvu se vypočítá podle vzorce:

$$L_{opt\ V} = \tau \cdot t_{AX} \cdot v_f \cdot (m - 1) \quad (4.29)$$

$$\begin{aligned} L_{opt\ V} &= \tau \cdot t_{AX} \cdot v_f \cdot (m - 1) = \tau \cdot t_{AX} \cdot f \cdot n_{opt\ V} \cdot (m - 1) \\ &= 0,952 \cdot 2 \cdot 0,12 \cdot 1464,35 \cdot (4,34 - 1) = 1117,92\ mm \end{aligned}$$

Počet obrobených kusů za minutu se vypočítá ze vztahu:

$$Q_T = \frac{T}{\tau \cdot t_{AS}} \quad (4.30)$$

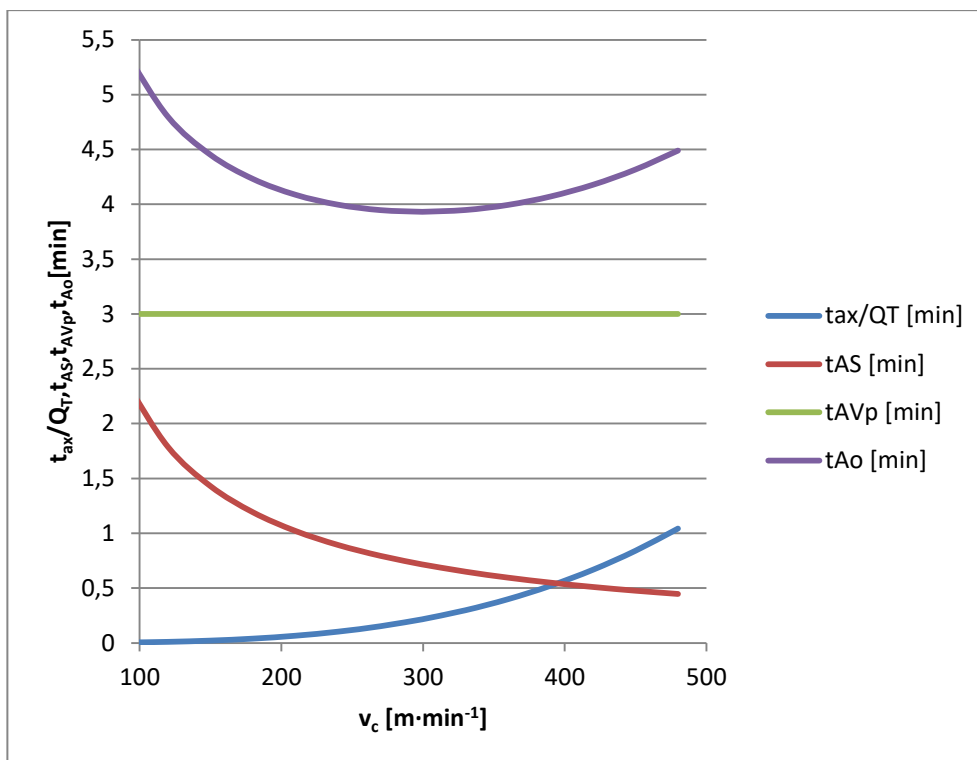
$$Q_T = \frac{T_{opt\ V}}{\tau \cdot t_{AS\ opt\ V}} = \frac{6,362}{0,952 \cdot 0,717} = 9,316\ kusů$$

Celkový operační čas jednotkové práce dle vzorce (4.17) je:

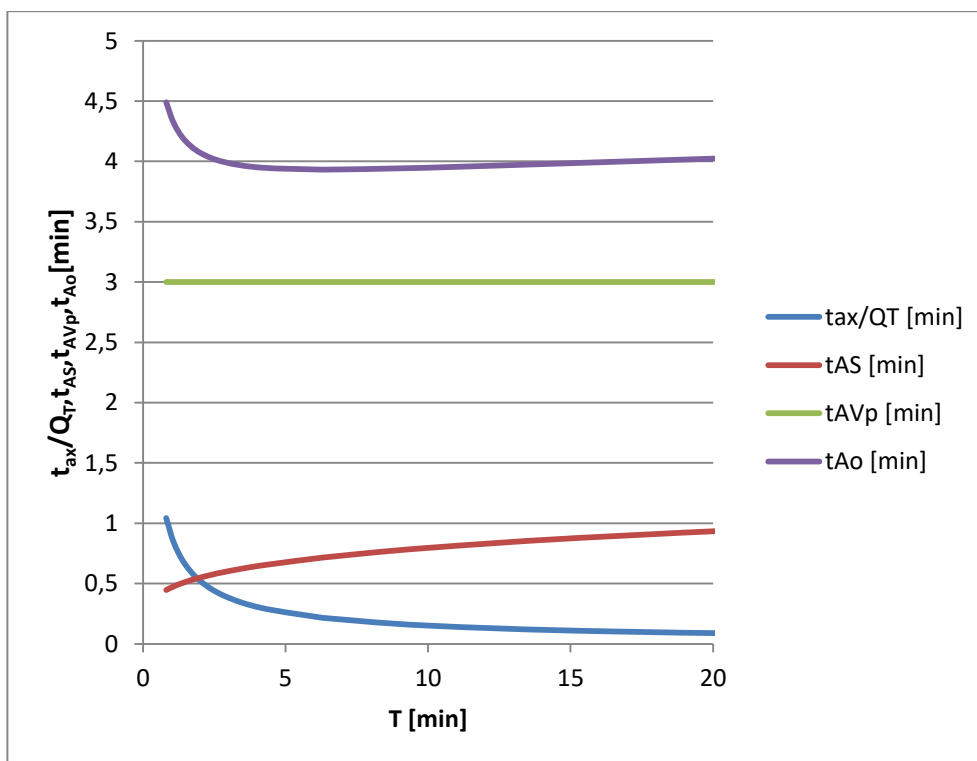
$$t_{Ao} = t_{AS} + t_{Av} + \frac{t_{AX}}{Q_T} = 0,717 + 3 + \frac{2}{9,316} = 3,932\ min$$

Při soustružení vnější válcové plochy podle kritéria maximální výrobnosti je optimální řezná rychlost 299,02 m·min<sup>-1</sup> a optimální trvanlivost 6,362 min. Z grafů (obr. 4.7 a 4.8) je zřejmé, že vypočtené hodnoty jsou skutečně optimální pro dosažení operačního času, který činí 3,932 min (viz také příloha 2).





Obr. 4.7 Průběh časů v závislosti na řezné rychlosti.



Obr. 4.8 Průběh časů v závislosti na trvanlivosti řezného nástroje.

**Výpočet operačních nákladů**

Náklady na jednotkovou strojní práci se vypočítají dle vztahu (2.3):

$$N_{ASp} = t_{AS\ opt\ V} \cdot N_{sm} = 0,717 \cdot 14 = 10,04\ K\check{c}$$

Náklady na jednotkovou vedlejší práci dle (2.8) jsou:

$$N_{AVp} = t_{AVp} \cdot N_{vm} = 3 \cdot 5 = 15\ K\check{c}$$

Počet výměn břitu nástroje na obrobení jednoho kusu dle (2.28) je:

$$z_v = \frac{t_{AS\ opt\ V}}{T_{optV}} \cdot \tau = \frac{0,83}{12,16} \cdot 0,952 = 0,1073$$

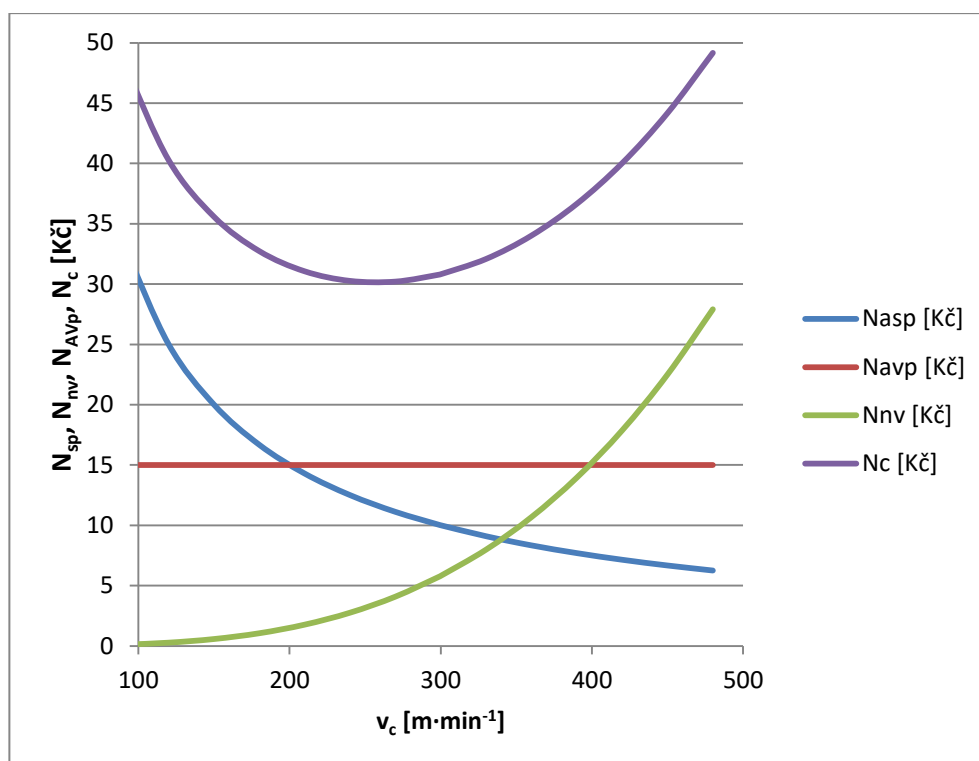
Náklady na nástroj a jeho výměnu se vypočítají dle vzorce (2.27):

$$N_{nv} = N_T \cdot z_v = 53,52 \cdot 0,1073 = 5,74\ K\check{c}$$

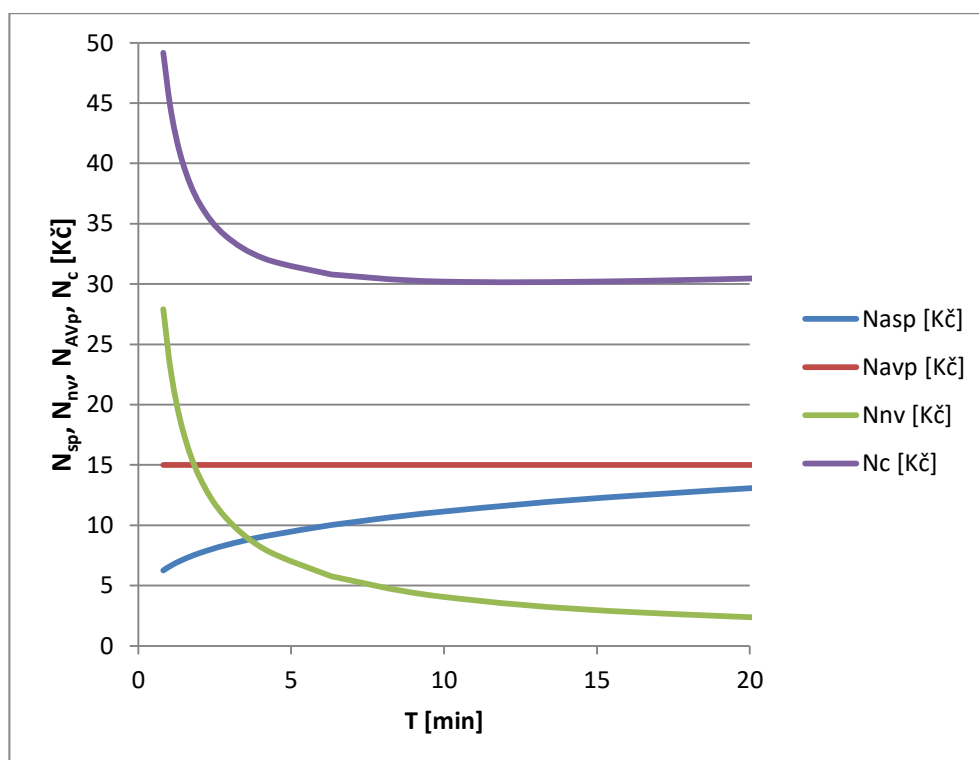
Celkové operační náklady pro kritérium maximální výrobnosti se dle vzorce (2.41) vypočítají jako:

$$N_c = N_{Sp} + N_{AVp} + N_{nv} = 10,04 + 15 + 5,74 = 30,78\ K\check{c}/ks$$

V tomto případě jsou při optimální řezné rychlosti celkové operační náklady 30,78 Kč (obr. 4.9). V grafu (obr. 4.10) je zobrazena závislost operačních nákladů na trvanlivosti.



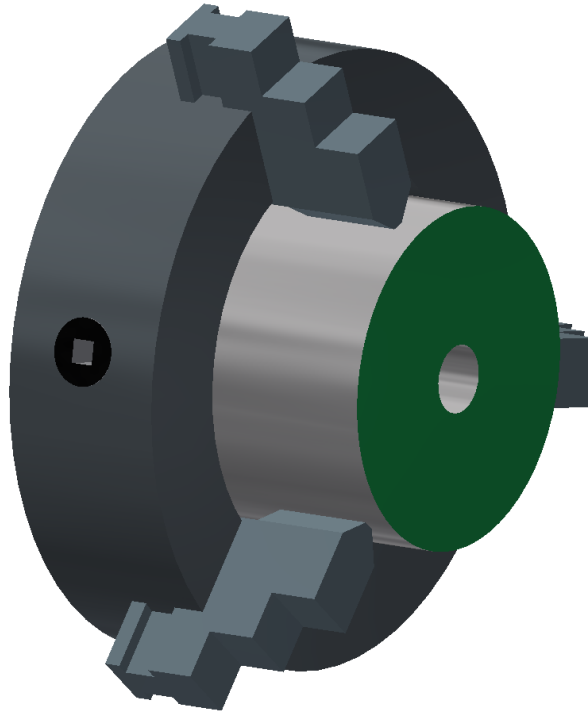
Obr. 4.9 Průběh operačních nákladů v závislosti na řezné rychlosti.



Obr. 4.10 Průběh operačních nákladů v závislosti na trvanlivosti.

## 4.6 Příklady optimalizace pro soustružení čelní plochy konstantní řeznou rychlostí

V této kapitole je provedena optimalizace při soustružení čelní plochy obrobku konstantní řeznou rychlostí. U zvolené součásti na obr. 4.11 se provádí optimalizace pro kritérium minimálních nákladů a kritérium maximální výrobnosti.



Obr. 4.11 Soustružená čelní plocha zvolené součásti.

### ZADÁNÍ:

- přířez o průměru  $D = 125 \text{ mm}$  a s otvorem  $d = 35 \text{ mm}$
- délka náběhu a přeběhu  $l_n = l_p = 2 \text{ mm}$
- čas jednotkové vedlejší práce  $t_{AVp} = 2 \text{ min}$

Ostatní předpoklady a řezné podmínky jsou stejné jako u soustružení válcové plochy (viz podkapitola 4.5).

### 4.6.1 Optimalizace pro kritérium minimálních operačních nákladů

V této části se stejně jako u soustružení vnější válcové plochy provedou výpočty za účelem nalezení nejvhodnější kombinace řezné rychlosti a trvanlivosti. Pro nalezení nejnižší hodnoty operačních nákladů se výpočtem zjišťuje optimální řezná rychlost, optimální trvanlivost a jednotkový strojní čas.

**Stanovení optimální řezné rychlosti**

Náklady na VBD se podle (2.23) vypočítají:

$$N_{Tn} = \frac{C_d \cdot z_d}{z_b \cdot s_b} = \frac{235 \cdot 1}{6 \cdot 0,9} = 43,52 \text{ Kč}$$

Náklady na výměnu nástroje se vypočítají dle (2.25):

$$N_{Tv} = t_{vn} \cdot N_{vnm} = t_{AX} \cdot N_{vnm} = 2 \cdot 5 = 10 \text{ Kč}$$

Výpočet nákladů na břit nástroje a jeho výměnu vztažené na jednu trvanlivost podle vzorce (2.17) je:

$$N_T = N_{Tn} + N_{Tv} = 43,52 + 10 = 53,52 \text{ Kč}$$

Poměr dráhy nástroje ve směru posuvu a délky obráběné plochy pro soustružení čelní dle vzorce (2.29) je:

$$\tau = \frac{l}{L} = \frac{\frac{D-d}{2}}{l_n + \frac{D-d}{2} + l_p} = \frac{\frac{125-35}{2}}{2 + \frac{125-35}{2} + 2} = 0,918$$

Optimální řezná rychlost pro soustružení čelní plochy pro kritérium maximální výrobnosti dle (4.16) je:

$$v_{c \text{ opt } N} = \left[ \frac{C_T \cdot N_{sm}}{t \cdot N_T \cdot (m-1)} \right]^{\frac{1}{m}} = \left[ \frac{3,53 \cdot 10^{11} \cdot \frac{840}{60}}{0,918 \cdot 53,52 \cdot (4,34-1)} \right]^{\frac{1}{4,34}} = 255,33 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$$

Otáčky stroje pro optimální řeznou rychlost při obrábění nejmenšího průměru  $d$  podle vzorce (3.2) jsou:

$$n_{d \text{ opt } N} = \frac{v_{\text{opt } N} \cdot 10^3}{\pi \cdot d} = \frac{255,33 \cdot 10^3}{\pi \cdot 35} = 2322,13 \text{ min}^{-1}$$

Otáčky stroje pro optimální řeznou rychlost při obrábění největšího průměru  $D$  podle vzorce (3.2) se vypočítají:

$$n_{D \text{ opt } N} = \frac{v_{\text{opt } N} \cdot 10^3}{\pi \cdot D} = \frac{255,33 \cdot 10^3}{\pi \cdot 125} = 650,2 \text{ min}^{-1}$$

Optimální trvanlivost řezného nástroje pro soustružení čelní plochy konstantní řeznou rychlostí pro kritérium minimálních nákladů dle (4.8) je:

$$T_{\text{opt } N} = \frac{60 \cdot \tau \cdot N_T}{N_{hs}} \cdot (m-1) = \frac{60 \cdot 0,918 \cdot 53,52}{840} \cdot (4,34-1) = 12,63 \text{ min}$$

Jednotkový strojní čas pro optimální řeznou rychlost dle vztahu (3.5) je:

$$t_{AS} = \frac{L}{v_f} = \pi \frac{(D + 2 \cdot l_n)^2 - (d + 2 \cdot l_p)^2}{4 \cdot 10^3 \cdot f \cdot v_{c \text{ opt } N}} \cdot i = \pi \frac{(125 + 2 \cdot 2)^2 - (35 + 2 \cdot 2)^2}{4 \cdot 10^3 \cdot 0,12 \cdot 255,33} \cdot 1$$

$$= 0,388 \text{ min}$$

### Výpočet operačních nákladů

Náklady na jednotkovou strojní práci dle vzorce (2.3) vychází:

$$N_{ASp} = t_{AS} \cdot N_{sm} = 0,388 \cdot 14 = 5,04 \text{ Kč}$$

Náklady na jednotkovou vedlejší práci dle (2.8) jsou:

$$N_{AVp} = t_{AVp} \cdot N_{vm} = 3 \cdot 5 = 15 \text{ Kč}$$

Počet výměn břitů nástroje na obrobení jednoho kusu se dle (2.28) vypočítá:

$$z_v = \frac{t_{AS}}{T} \cdot \tau = \frac{0,388}{12,63} \cdot 0,918 = 0,02819$$

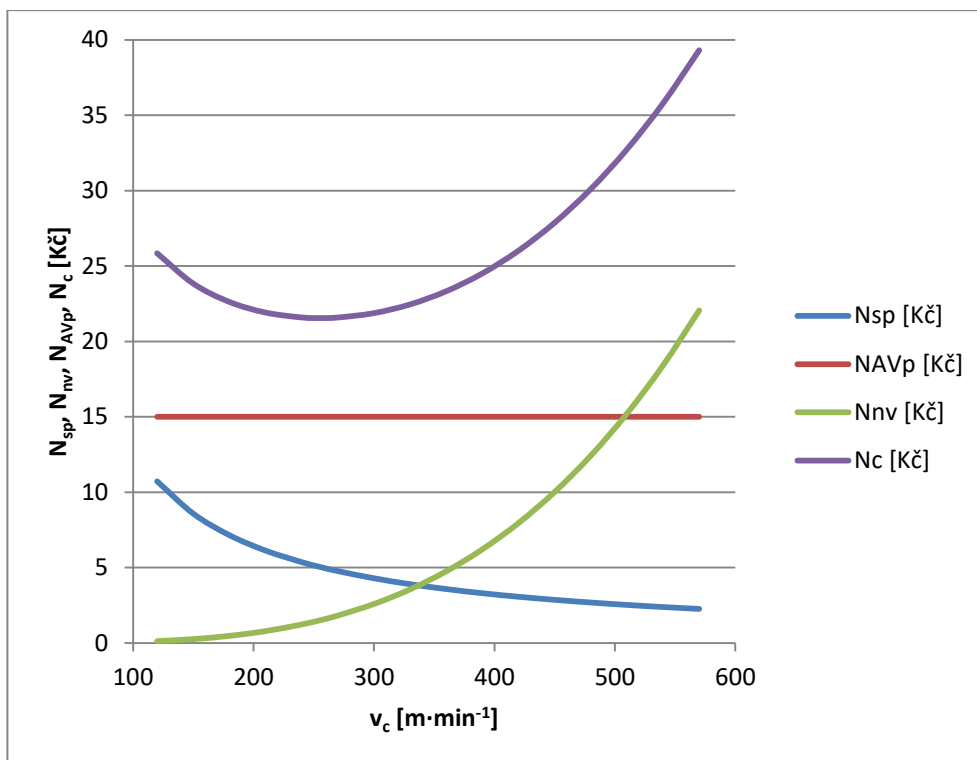
Náklady na nástroj a jeho výměnu dle (2.27) jsou:

$$N_{nv} = N_T \cdot z_v = 53,52 \cdot 0,02819 = 1,5087 \text{ Kč}$$

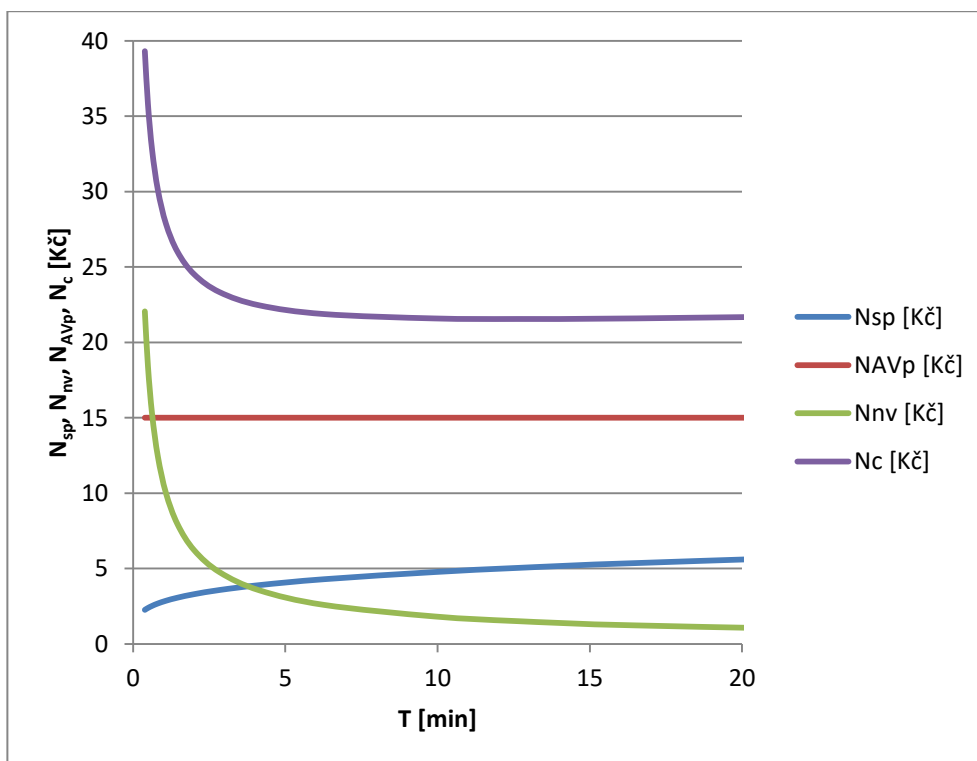
Celkové operační náklady dle (2.41) jsou:

$$N_c = N_{Sp} + N_{AVp} + N_{nv} = 5,04 + 15 + 1,51 = 21,55 \text{ Kč/ks}$$

Při soustružení čelní plochy konstantní řeznou rychlostí podle kritéria minimálních nákladů je optimální řezná rychlost  $255,33 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  a optimální trvanlivost  $12,63 \text{ min}$ . Z grafů (obr. 4.12 a 4.13) je zřejmé, že vypočtené hodnoty jsou skutečně optimální pro dosažení minimálních operačních nákladů, které činí  $21,55 \text{ Kč/ks}$ . Toto potvrzuje i tabulka závislosti operačních nákladů a trvanlivosti na řezné rychlosti, uvedená v příloze 3.



Obr. 4.12 Průběh operačních nákladů v závislosti na řezné rychlosti.



Obr. 4.13 Průběh operačních nákladů v závislosti na trvanlivosti.

#### 4.6.2 Optimalizace pro kritérium maximální výrobnosti

V této části, podobně jako u soustružení vnější válcové plochy, je cílem nalezení nejvhodnější kombinace řezné rychlosti a trvanlivosti tak, aby zadaná součást byla vyrobena co nejrychleji. To znamená i nalezení minimální hodnoty operačního času, pro splnění podmínky maximální výrobnosti.

##### Stanovení optimální řezné rychlosti

Optimální řezná rychlost pro kritérium maximální výrobnosti dle (4.28) je:

$$v_{c \text{ opt } V} = \left[ \frac{C_T}{\tau \cdot t_{AX} \cdot (m-1)} \right]^{\frac{1}{m}} = \left[ \frac{3,53 \cdot 10^{11}}{0,918 \cdot 2 \cdot (4,34-1)} \right]^{\frac{1}{4,34}} = 301,54 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$$

Otáčky stroje pro optimální řeznou rychlost při obrábění nejmenšího průměru  $d$  podle vzorce (3.2) jsou:

$$n_{d \text{ opt } N} = \frac{v_{\text{opt } N} \cdot 10^3}{\pi \cdot d} = \frac{301,54 \cdot 10^3}{\pi \cdot 35} = 2742,38 \text{ min}^{-1}$$

Otáčky stroje pro optimální řeznou rychlost při obrábění největšího průměru  $D$  podle vzorce (3.2) jsou:

$$n_{D \text{ opt } N} = \frac{v_{\text{opt } N} \cdot 10^3}{\pi \cdot D} = \frac{301,54 \cdot 10^3}{\pi \cdot 125} = 767,86 \text{ min}^{-1}$$

Optimální trvanlivost nástroje pro kritérium maximální výrobnosti při obrábění čelní plochy konstantní řeznou rychlostí se vypočítá dle (4.21):

$$T_{\text{opt } V} = \tau \cdot t_{AX} \cdot (m-1) = 0,918 \cdot 2 \cdot (4,34-1) = 6,135 \text{ min}$$

Jednotkový strojní čas se vypočítá dle (3.5):

$$t_{AS} = \frac{L}{v_f} \cdot i = \pi \frac{(D+2 \cdot l_n)^2 - (d+2 \cdot l_p)^2}{4 \cdot 10^3 \cdot f \cdot v_{c \text{ opt } V}} \cdot i = \pi \frac{(125+2 \cdot 2)^2 - (35+2 \cdot 2)^2}{4 \cdot 10^3 \cdot 0,12 \cdot 301,54} \cdot 1 = 0,328 \text{ min}$$

Počet obrobených kusů za minutu dle (4.30) je:

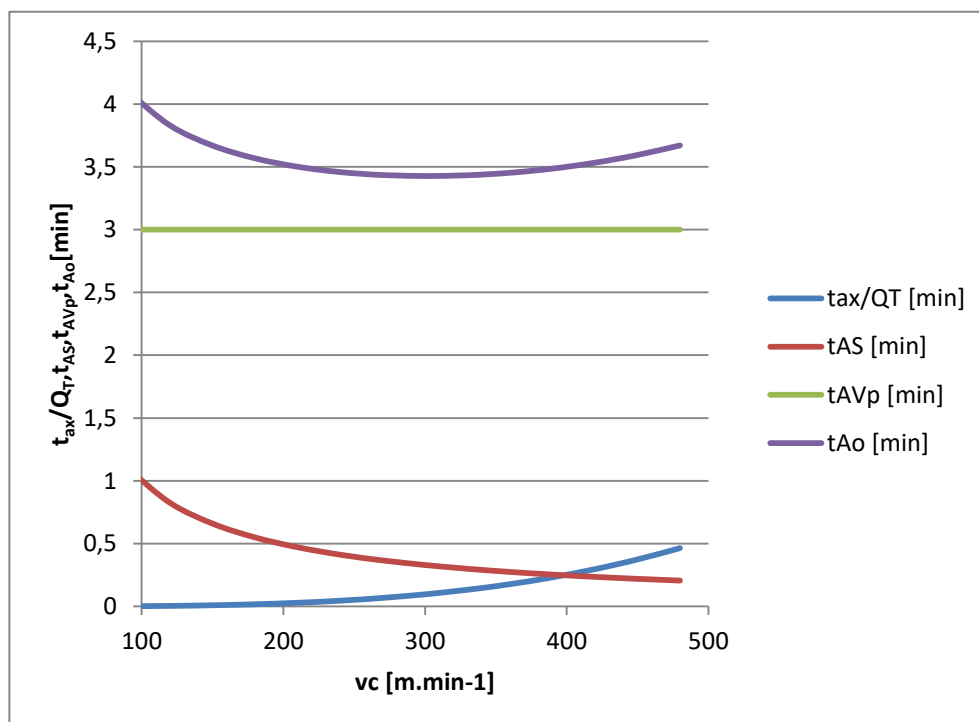
$$Q_T = \frac{T_{\text{opt } V}}{\tau \cdot t_{AS \text{ opt } V}} = \frac{6,135}{0,918 \cdot 0,328} = 20,354 \text{ kusů}$$

Celkový operační čas jednotkové práce dle (4.17) je:

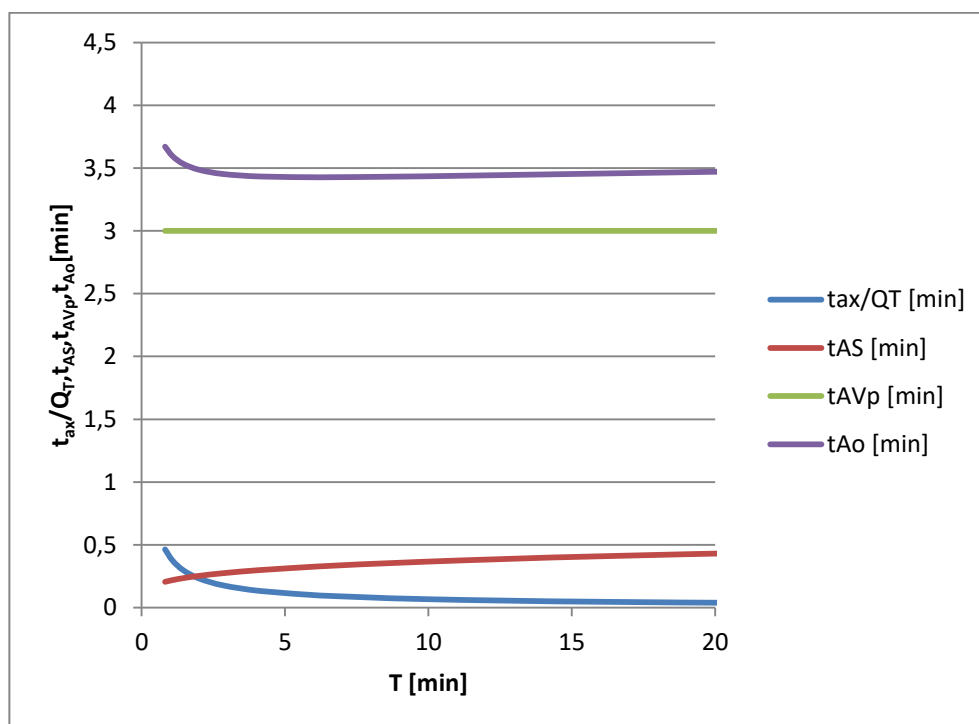
$$t_{Ao} = t_{AS} + t_{Av} + \frac{t_{AX}}{Q_T} = 0,328 + 3 + \frac{2}{20,354} = 3,426 \text{ min}$$



Při soustružení čelní plochy konstantní řeznou rychlostí podle kritéria maximální výrobnosti je optimální řezná rychlost  $301,54 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  a optimální trvanlivost 6,135 min. Z grafů (obr. 4.14 a 4.15) je zřejmé, že vypočtené hodnoty jsou skutečně optimální pro dosažení operačního času, který činí 3,426 min (viz také příloha 3).



Obr. 4.14 Průběh časů v závislosti na řezné rychlosti.



Obr. 4.15 Průběh časů v závislosti na trvanlivosti.

### Výpočet operačních nákladů

Náklady na jednotkovou strojní práci se dle (2.3) vypočítají:

$$N_{ASp} = t_{AS\ opt\ V} \cdot N_{sm} = 0,328 \cdot 14 = 4,592\ K\check{c}$$

Náklady na jednotkovou vedlejší práci podle (2.8) jsou:

$$N_{AVp} = t_{AVp} \cdot N_{vm} = 3 \cdot 5 = 15\ K\check{c}$$

Počet výměn břitu nástroje na obrobení jednoho kusu se vypočítá dle (2.28):

$$z_v = \frac{t_{AS\ opt\ V}}{T_{opt\ V}} \cdot \tau = \frac{0,328}{6,135} \cdot 0,912 = 0,049$$

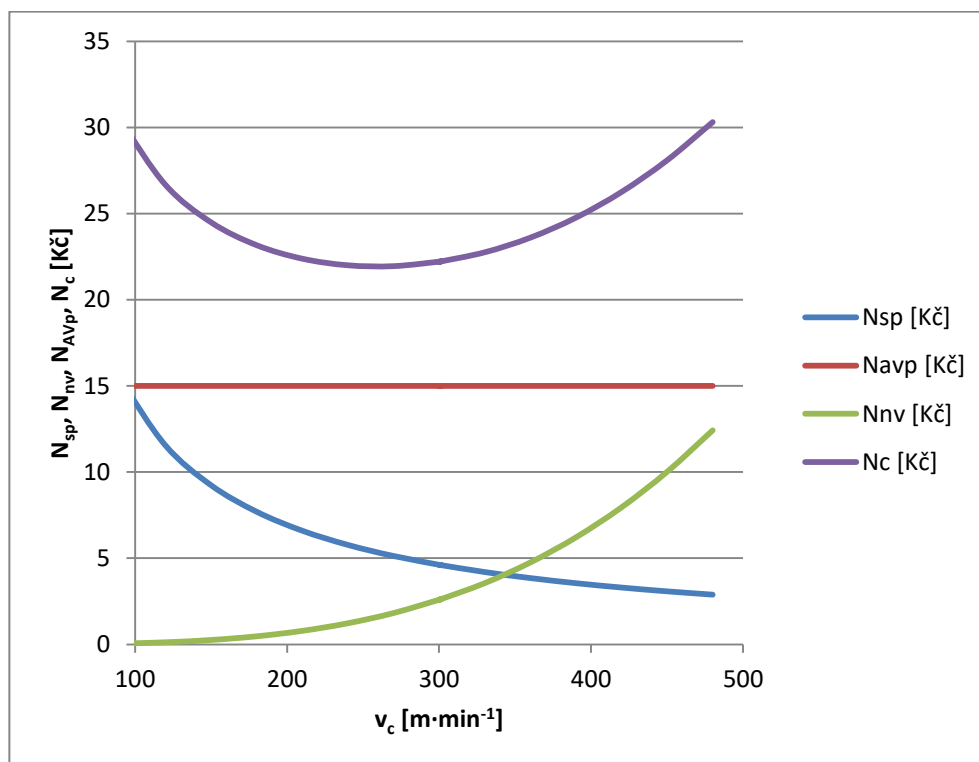
Náklady na nástroj a jeho výměnu se vypočítají dle (2.27):

$$N_{nv} = N_T \cdot z_v = 53,52 \cdot 0,049 = 2,63\ K\check{c}$$

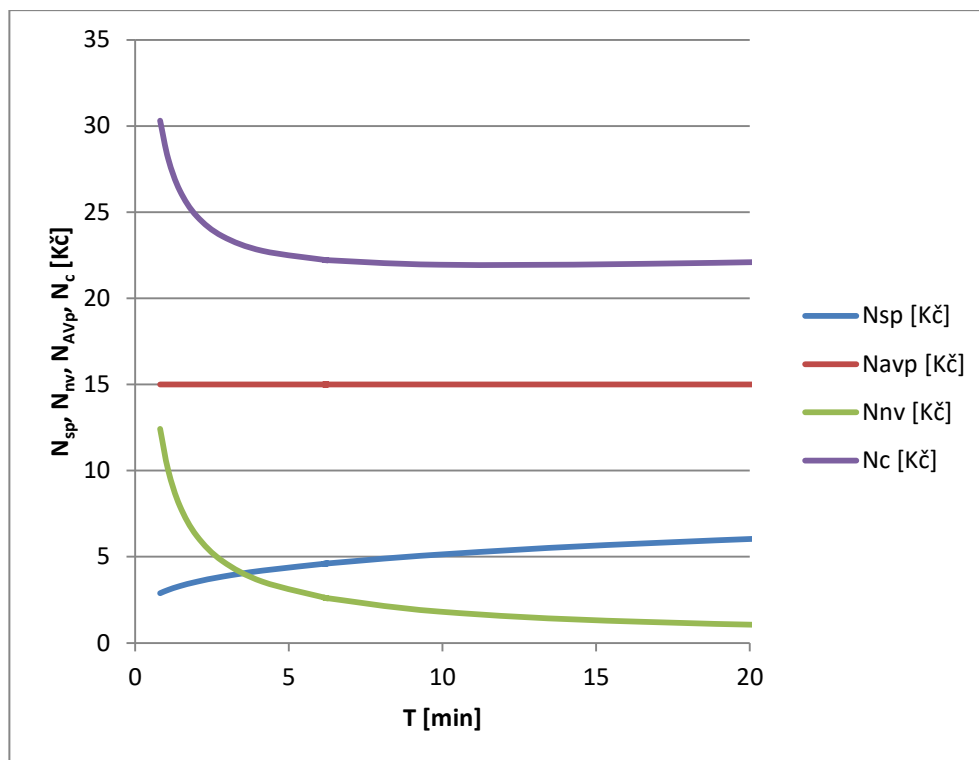
Celkové operační náklady podle vztahu (2.41) jsou:

$$N_c = N_{ASp} + N_{AVp} + N_{nv} = 4,592 + 15 + 2,63 = 22,22\ K\check{c}$$

V tomto případě jsou při optimální řezné rychlosti celkové operační náklady 22,22 Kč (obr. 4.16). V grafu (obr. 4.17) je zobrazena závislost operačních nákladů na trvanlivosti.



Obr. 4.16 Průběh operačních nákladů v závislosti na řezné rychlosti.



Obr. 4.17 Průběh operačních nákladů v závislosti na trvanlivosti.

## ZÁVĚR

Tato práce se zabývá analýzou operačních nákladů a jejich optimalizací. V úvodní části jsou vyjmenovány a podrobně popsány složky operačních nákladů. Zejména jsou zde popsány náklady na jednotkovou práci, náklady na nástroj a materiál. U nákladů na nástroj a jeho výměnu jsou podrobně rozepsány vlastnosti řezných nástrojů a jejich opotřebení v průběhu obráběcího procesu.

Je zde věnována pozornost i volbě polotovaru. Pomocí stupně využití materiálu lze rozhodnout, jakým procesem se připraví polotovar pro obrábění. Lze použít přířez, odlitek nebo výkovek. Správnou volbou je možné ušetřit nejen náklady, ale i čas na obrábění přídavků. Dále jsou rozebrány jednotkové strojní časy u základních metod obrábění. Ty jsou velice důležité, protože mají zásadní vliv na celkové operační náklady.

Cílem práce bylo určit optimální řeznou rychlost a trvanlivost břitu pro soustružení vnější válcové a čelní plochy. Dále se zjišťovaly nejnižší celkové operační náklady potřebné na obrobení jednoho obrobku, které odpovídají vypočítané optimální řezné rychlosti.

Optimalizace byla provedena podle dvou kritérií. Prvním bylo kritérium minimálních nákladů, u nichž jde o nalezení řezných podmínek, pro které jsou celkové operační náklady nejnižší. Jako druhé bylo použito kritérium optimálnosti z hlediska výrobnosti. Zde se zjišťuje minimální čas na obrobení jednoho kusu, to znamená maximální možný počet kusů vyrobený za určitý čas.

Z výpočtů a grafů lze vyčíst, že:

- nejnižší celkové operační náklady jsou při optimální řezné rychlosti,
- optimální řezná rychlost závisí především na materiálu nástroje (konstanty Taylorova vztahu) a jednotkovém času nepravidelné obsluhy (výměna břitové destičky),
- optimální trvanlivost závisí na řezné rychlosti a materiálu řezného nástroje,
- na celkové náklady na obrobení jednoho kusu mají největší vliv náklady na provoz stroje – hodně záleží na pořizovací ceně obráběcího stroje,
- náklady na jednotkovou vedlejší práci souvisí s časy, kdy je vřeteno stroje v klidu – nejsou tedy závislé na řezných podmínkách,
- náklady na nástroj a jeho výměnu jsou závislé hlavně na zvolené VBD (cena a počet břitů),
- využití optimalizace je vhodné pro obrobky větších rozměrů a při obrábění na drahých obráběcích strojích.

Při optimalizaci je nutné brát ohled na omezení danými výrobními podmínkami. Omezující podmínky jsou dány obráběcím strojem (výkon, kroutící moment, rozsah otáček apod.), nástrojem (materiál, geometrie apod.), materiálem obrobku, požadovanými kvalitativními parametry atd.

Pokud není pro výrobu vhodné žádné z uvedených kritérií optimálnosti, je použita vícekritériální optimalizace. Jde o kombinaci kritérií, kde se nejčastěji volí vhodný poměr minimálních výrobních nákladů a maximální produktivity.

V současnosti nachází své uplatnění adaptivní optimalizace, která je nejčastěji aplikována na CNC obrábění. V podstatě jde o okamžité stanovení optimálních řezných podmínek, které vycházejí z informací o aktuálním stavu obráběcího procesu. K tomuto se využívá regulační obvod, který stanoví optimální řezné podmínky podle omezujících podmínek a zvoleného kritéria optimálnosti. Pro složitější adaptivní optimalizaci se využívají kalkulace na počítači, který je součástí řídicího systému obráběcího stroje.

---

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ A ZKRATEK

- [1] KŘÍŽ, Rudolf a VÁVRA, Pavel. *Strojírenská příručka*. 7. svazek. Praha: Scientia, 1996, s. 216. ISBN 80-7183-024-0.
- [2] KALNAŠI, Radoslav. *Ekonomická analýza obráběcího procesu*. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně. 2012, 91 s.
- [3] MÁDL, Jan a KVASNIČKA, Ivan. *Optimalizace obráběcího procesu*. Praha: ČVUT, 1998, s. 168. ISBN 80-01-01864-6.
- [4] KOČMAN, Karel a PROKOP, Jaroslav. *Technologie obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM. 2001, 272 s. ISBN 80-214-1996-2.
- [5] ZEMČÍK, Oskar. *Technologická příprava výroby*. Brno: Akademické nakladatelství CERM. 2002, s. 158. ISBN 80-214-2219-X.
- [6] ČEP, Robert a PETRŮ, Jana. *Experimentální metody v obrábění*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava. 2011, 143 s. ISBN 80-248-2533-5.
- [7] ŠEBELOVÁ, Eva. *Optimalizace parametrů obrábění materiálů na bázi dřeva*. Disertační práce. Brno: Mendelova univerzita v Brně. 2014, 128 s.
- [8] HUMÁR, Anton. *Technologie I – Technologie obrábění 1. část*. Studijní opora pro magisterskou formu studia [online]. Brno: VUT. 2003 [cit. 2017-04-14]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI\\_TO-1cast.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf)
- [9] FOREJT, Milan a PÍŠKA, Miroslav. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Dotisk 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM. 2012, 226 s. ISBN 80-214-2374-9.
- [10] AB SANDVIK COROMANT - SANDVICK CZ s.r.o., *Příručka obrábění – Kniha pro praktiky*. Praha: Scientia. 1997, 857 s. ISBN 91-97 22 99-4-6.
- [11] FOREJT, Milan a kol. *Experimentální metody*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. 2003, 83 s.
- [12] *Katalog Pramet 2016* [online]. 2016 [cit. 2017-04-22] Dostupné z: <http://www.dormerpramet.com/cs-cz/pages/default.aspx?country=cz>
- [13] *Teorie obrábění*. Studijní text. Západočeská univerzita, Katedra Technologie obrábění. 100 s.
- [14] RYBKA, Libor. *Ekonomická analýza výrobního procesu*. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně. 2011, 58 s.
- [15] DRDA, David. *Technologické a ekonomické parametry řezného nástroje*. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně. 2009, 61 s.
- [16] *Vrtání, vyvrtávání, vyhrubování, vystružování a zahlubování* [online]. Prezentace DTB Technologie. [cit. 2017-04-14]. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/1917599/>
- [17] KOČMAN, Karel a PROKOP, Jaroslav. *Speciální technologie obrábění: Řešené příklady*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. 2003, 127 s.
- [18] KOČMAN, Karel a PROKOP, Jaroslav. *Technologie výroby II: Řešené příklady* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně. 2002, 63 s. [cit. 2017-04-14]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TechnVyroby\\_II.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TechnVyroby_II.pdf)

Symbol	Jednotka	Popis
$C_d$	[Kč]	cena břitové destičky
$C_E$	[Kč]	cena spotřebovaných energií za hodinu
$CFS_{EFPL}$	[hod]	roční časový fond stroje při jedné směně
$C_{mat}$	[Kč]	cena materiálu za kilogram
$C_n$	[Kč]	cena nástroje
$C_{pn}$	[Kč]	cena pořízení nástroje
$C_{si}$	[Kč]	cena stroje plus náklady na instalaci stroje
$C_T$	[-]	konstanta
$C_{tn}$	[Kč]	cena tělesa nástroje
$C_v$	[-]	konstanta
$C_{v1}$	[-]	konstanta
$C_{vT}$	[-]	konstanta pro stanovenou trvanlivost
$C_{vžš}$	[Kč]	cena výkupu železného šrotu za kilogram
$C_{zn}$	[Kč]	zbytková cena nástroje
$D$	[mm]	průměr obrobku
$D_s$	[mm]	průměr frézy
$H$	[mm]	celkový přírůstek na obrábění
$HRP_{os}$	[Kč]	režijní paušál ostřírny za hodinu
$HRP_{SP}$	[Kč]	hodinový režijní paušál
$KAP$	[hod]	kapacita střediska
$KB$	[mm]	šířka žlábků opotřebení čela
$KM$	[mm]	poloha středu žlábků opotřebení čela
$KT$	[mm]	hloubka žlábků opotřebení čela
$L$	[mm]	dráha nástroje ve směru posuvu
$L_T$	[mm]	celková délka děleného tyčového materiálu
$M_o$	[Kč]	hodinové mzdové náklady na operátora
$M_{os}$	[Kč]	mzdové náklady na ostříče za hodinu
$M_s$	[Kč]	mzdové náklady na seřizovače za hodinu
$N_{1pn}$	$[Kč \cdot min^{-1}]$	náklady na jednu minutu provozu nástroje
$N_{1pno}$	$[Kč \cdot min^{-1}]$	náklady na jednu minutu provozu nástroje, který se přeastřuje
$N_{1pnv}$	$[Kč \cdot min^{-1}]$	náklady na jednu minutu provozu nástroje s více břity
$N_{Ap}$	[Kč]	náklady na jednotkovou práci
$N_{ASp}$	[Kč]	náklady na jednotkovou strojní práci
$N_{AVp}$	[Kč]	náklady na jednotkovou vedlejší práci
$N_c$	[Kč]	celkové operační náklady
$N_{hs}$	[Kč]	náklady na provoz stroje za hodinu
$N_m$	[kg]	norma spotřeby materiálu
$N_{mat}$	[Kč]	náklady na materiál
$N_{mo}$	[kg]	norma spotřeby materiálu u odlitku
$N_{nv}$	[Kč]	náklady na nástroj a jeho výměnu vztažené na jeden kus

Symbol	Jednotka	Popis
$N_o$	[Kč]	náklady na závislé na počtu ostření nástroje
$N_{ob}$	[Kč]	náklady na obrábění
$N_p$	[Kč]	náklady na výrobu polotovaru
$N_{pn}$	[Kč]	náklady na zhotovení nového polotovaru
$N_{ps}$	[Kč]	náklady na zhotovení stávajícího polotovaru
$N_s$	[Kč]	náklady na strojní práci
$n_{sf}$	[min <sup>-1</sup> ]	frekvence otáček frézy
$N_{sm}$	[Kč]	náklady na minutu strojní práce
$N_T$	[Kč]	náklady na nástroj a jeho výměnu vztažené na jednu trvanlivost
$N_{Tn}$	[Kč]	náklady na provoz nástroje vztažené na jednu trvanlivost bříty
$N_{Tv}$	[Kč]	náklady na jednu výměnu nástroje
$N_v$	[Kč]	náklady na vedlejší práci
$N_{vm}$	[Kč]	náklady na minutu vedlejší práce
$N_{vnm}$	[Kč]	náklady na výměnu nástroje za minutu
$O_s$	[Kč]	odpis stroje za hodinu
$Q_c$	[kg]	hmotnost materiálu vkládaného do pece k ohřevu
$Q_k$	[kg]	jednotková hmotnost nevyužitého konce tyče
$Q_o$	[kg]	jednotková hmotnost hotové součástky
$Q_p$	[kg]	jednotková hmotnost polotovaru
$Q_s$	[kg]	čistá jednotková hmotnost součásti
$Q_T$	[-]	počet kusů obrobených za jednu trvanlivost nástroje
$Q_v$	[kg]	jednotková hmotnost výkovku
RN	[Kč]	režijní náklady
SM	[-]	směnnost
T	[min]	trvanlivost nástroje
$T_i$	[min]	trvanlivosti jednotlivých ostří destičky
$U_c$	[mm]	šířka řezného nástroje (šířka prořezu)
$U_m$	[Kč]	úspory v nákladech na materiál
$U_o$	[Kč]	úspory v nákladech při obrábění polotovaru
VB	[mm]	opotřebení hřbetu průměrné
$VB_c$	[mm]	opotřebení hřbetu v oblasti špičky
$VB_{max}$	[mm]	opotřebení hřbetu maximální
$VB_N$	[mm]	opotřebení hřbetu vrubové
VR	[mm]	radiální opotřebení špičky
$Z_s$	[rok]	životnost stroje
$a_p$	[mm]	šířka záběru ostří
c	[mm]	bezpečnostní náběh 1 až 2
d	[mm]	minimální průměr obrobku
f	[mm]	posuv na otáčku
$f_z$	[mm]	posuv nástroje na zub



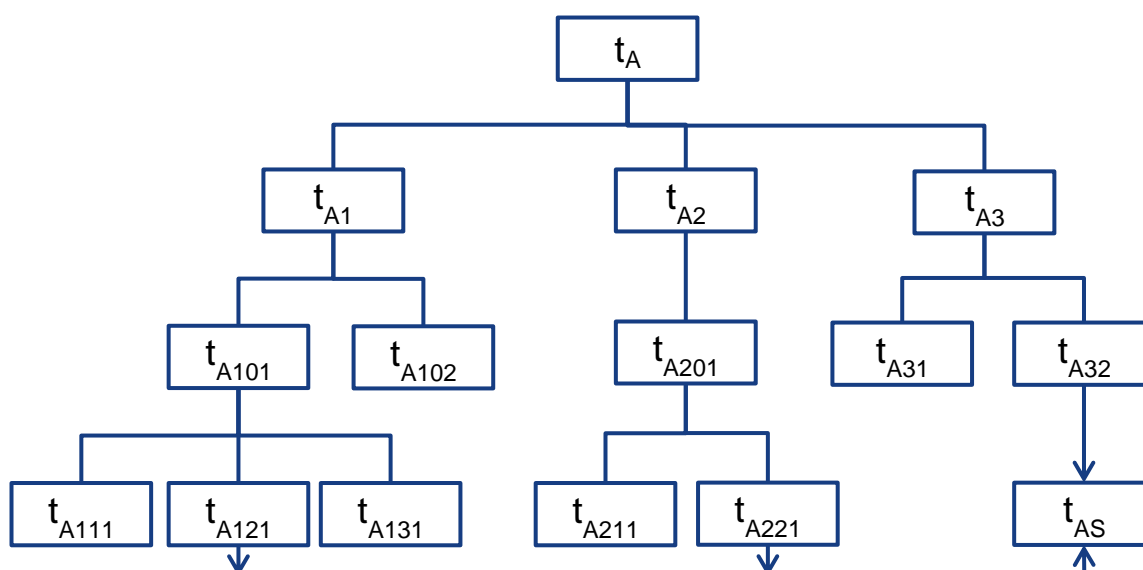
Symbol	Jednotka	Popis
$i$	[-]	počet záběrů
$k_c$	[-]	přirážka času směnového
$k_m$	[-]	stupeň využití materiálu
$k_{us}$	[-]	koeficient oprav a údržby stroje
$k_{ut}$	[-]	koeficient údržby tělesa nástroje
$k_{vs}$	[-]	koeficient časového využití stroje
$l$	[mm]	délka obráběné součásti
$l_n$	[mm]	délka náběhu
$l_p$	[mm]	délka přeběhu
$l_s$	[mm]	délka polotovaru
$m$	[-]	exponent z Taylorova vztahu
$n$	[min <sup>-1</sup> ]	otáčky
$n_p$	[ks]	počet přířezů z tyčového materiálu
$q$	[-]	počet použitelných ostří destičky
$q_{\check{c}}$	[kg]	jednotkové ztráty materiálu při broušení odlitku
$q_k$	[kg]	jednotkové ztráty vzniklé z nevyužitého konce tyče
$q_o$	[kg]	jednotkové ztráty vzniklé obráběním polotovaru
$q_{op}$	[kg]	jednotkové ztráty opalem při ohřevu
$q_{prop}$	[kg]	jednotkové ztráty materiálu propalem
$q_u$	[kg]	jednotkové ztráty vzniklé dělením tyče
$q_u$	[kg]	jednotkové ztráty vzniklé dělením tyčového materiálu
$q_v$	[kg]	jednotkový odpad materiálu z výronku
$s_b$	[-]	součinitel využití břitových destiček
$t$	[-]	poměr dráhy nástroje ve směru posuvu a délky obráběné plochy
$t_A$	[min]	jednotkový čas
$t_{A1}$	[min]	čas jednotkové práce
$t_{A102}$	[min]	čas jednotkové práce nepravidelný
$t_{A111}$	[min]	čas jednotkové práce za klidu stroje v operaci
$t_{A121}$	[min]	čas jednotkové práce za chodu stroje v operaci
$t_{A131}$	[min]	čas jednotkové práce strojně ruční v operaci
$t_{A2}$	[min]	jednotkový čas obecně nutných přestávek v operaci
$t_{A3}$	[min]	jednotkový čas podmíněčně nutných přestávek v operaci
$t_{Ao}$	[min]	operační čas jednotkové práce
$t_{AS}$	[min]	jednotkový strojní čas
$t_{ASn}$	[min]	jednotkový strojní čas při konstantní frekvenci otáček
$t_{ASv}$	[min]	jednotkový strojní čas při konstantní rezné rychlosti
$t_{AV}$	[min]	jednotkový vedlejší čas
$t_{AVp}$	[min]	čas jednotkové vedlejší práce
$t_{AX}$	[min]	čas jednotkové nepravidelné obsluhy
$t_{os}$	[min]	čas ostření nástroje

Symbol	Jednotka	Popis
$t_{vn}$	[min]	čas na výměnu nástroje
$v_c$	$[m \cdot min^{-1}]$	řezná rychlost
$v_{cT}$	$[m \cdot min^{-1}]$	řezná rychlost pro stanovenou trvanlivost
$v_f$	$[mm \cdot min^{-1}]$	posuvová rychlost
$x$	[-]	počet možných ostření nástroje
$x_v$	[-]	exponent
$y_v$	[-]	exponent
$z$	[-]	počet zubů frézy
$z_b$	[-]	počet břitů na destičce
$z_d$	[-]	počet břitových destiček na nástroji
$z_m$	[kg]	celkové jednotkové ztráty materiálu při výrobě součásti obráběním
$z_o$	[-]	počet možných přeostržení nástroje
$z_u$	[-]	předpokládaný počet upnutí destiček za dobu životnosti tělesa nástroje
$z_v$	[-]	počet výměn břitů nebo ostření nástroje
$\varepsilon$	[°]	úhel špičky ostří
$\kappa$	[°]	úhel nastavení hlavního ostří
$\tau$	[-]	poměr dráhy nástroje ve směru posuvu a délky obráběné plochy

## SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1: Základní složky normy jednotkového času.
- Příloha 2: Tabulky vypočítaných hodnot pro soustružení vnější válcové plochy.
- Příloha 3: Tabulky vypočítaných hodnot pro soustružení čelní plochy.
- Příloha 4: Vytvořený program v softwaru Microsoft Excel, který slouží pro výpočet optimalizace operačních nákladů pro kritérium minimálních výrobních nákladů a pro kritérium maximální produktivity.

## Příloha 1: Základní složky normy jednotkového času



- $t_A$  [min] ... jednotkový čas
- $t_{A1}$  [min] ... čas jednotkové práce
- $t_{A101}$  [min] ... čas jednotkové nepravidelné obsluhy v operaci (činnosti, které jsou vykonávány pracovníkem nepravidelně, např. ostření nástroje, výměna břitové destičky)
- $t_{A102}$  [min] ... čas jednotkové práce nepravidelný (čas obsluhy, který se vyskytuje nepravidelně a zajišťuje průběh technologické operace, například seřízení opotřebovaných nástrojů a jejich výměna)
- $t_{A111}$  [min] ... čas jednotkové práce za klidu stroje v operaci (upínání a odepínání obrobku, měření, obsluha stroje apod.)
- $t_{A121}$  [min] ... čas jednotkové práce za chodu stroje v operaci (činnosti, které vykonává pracovník během automatického chodu stroje, jako např. kontrola předchozího kusu, pozorování obráběcího cyklu, kontrolní měření apod.)
- $t_{A131}$  [min] ... čas jednotkové práce strojně ruční v operaci (činnosti, které vykonává pracovník ručně, jako např. přísuv do řezu při soustružení, kdy hlavní řezný pohyb vykonává stroj, např. rotace obrobku)
- $t_{A2}$  [min] ... jednotkový čas obecně nutných přestávek v operaci (čas na oddech u namáhavých prací, a podobně)
- $t_{A201}$  [min] ... jednotkový čas obecně nutných přestávek (oddech)
- $t_{A211}$  [min] ... jednotkový čas obecně nutných přestávek za klidu stroje v operaci (je nutná plná pracovníková přítomnost, protože zde není zabezpečený automatický chod stroje)
- $t_{A221}$  [min] ... jednotkový čas obecně nutných přestávek za chodu stroje v operaci (čas, který pracovník může využít k oddechu a aktivnímu pozorování, protože je zde zabezpečen automatický chod stroje)
- $t_{A3}$  [min] ... jednotkový čas podmíněčně nutných přestávek v (čas na ukončení cyklu stroje apod.)
- $t_{A31}$  [min] ... jednotkový čas podmíněčně nutných přestávek za klidu stroje v operaci (čas, kdy pracovník čeká např. na dovoz materiálu jeřábem, zvedání břemena apod.)
- $t_{A32}$  [min] ... jednotkový čas podmíněčně nutných přestávek za chodu stroje (čas, kdy pracovník čeká na ukončení pracovního cyklu stroje apod. a je závislý na počtu vyráběných jednic)
- $t_{AS}$  [min] ... jednotkový čas strojní v operaci (jsou zde zahrnuty všechny technologické časy, které jsou vykonávány automatickým chodem stroje)

## Příloha 2: Tabulky vypočítaných hodnot pro soustružení vnější válcové plochy

## Vnější válcová plocha – minimální náklady

ROZMĚRY OBROBKU			
D	65	mm	Průměr obráběné plochy
l	120	mm	Délka obráběné plochy
ŘEZNÉ PODMÍNKY			
$a_p$	0,2	mm	Šířka záběru ostří
f	0,12	mm	Posuv na otáčku
$l_n$	3	mm	Délka náběhu
$l_p$	3	mm	Délka přeběhu
i	1	-	Počet záběrů
ČASY			
$t_{Avp}$	3	min	Jednotková vedlejší práce
$t_{AX}$	2	min	Jednotkový čas nepravidelné obsluhy
NÁKLADY			
$N_{hs}$	840	Kč	Hodina provozu stroje
$N_{vm}$	5	Kč	Minuta vedlejší práce
$N_{vnm}$	5	Kč	Náklady na výměnu nástroje za minutu
VBD			
$C_d$	235	Kč	Cena břitové destičky
$z_d$	1	-	Počet břitových destiček na nástroji
$z_b$	6	-	Počet břitů na destičce
$S_b$	0,9	-	Součinitel využití břitových destiček
KONSTANTY			
m	4,34	-	Exponent
$C_v$	458	-	Konstanta z Taylorova vztahu
$C_T$	3,5331E+11	-	Konstanta z Taylorova vztahu
$N_{sm}$	14,00	Kč	Náklady na minutu strojní práce
$N_T$	53,52	Kč	Náklady na břit nástroje a jeho výměnu vztažené na jednu trvanlivost
$\tau$	0,952	-	Poměr dráhy nástroje a obráběné plochy
$v_{coptN}$	257,56	$m \cdot min^{-1}$	Optimální řezná rychlost
$n_{optN}$	1261,30	$min^{-1}$	Optimální otáčky
$T_{optN}$	12,16	min	Optimální trvanlivost
$L_{optN}$	1840,48	mm	Optimální relativní dráha nástroje vůči obrobku
Q	15,34	ks	Počet obrobků
$U_{optN}$	6,18	$cm^3 \cdot min^{-1}$	Optimální úběr materiálu
OPTIMÁLNÍ NÁKLADY			
$N_{sopt}$	11,65	Kč	Pro jednotkovou strojní práci
$N_{vopt}$	15,00	Kč	Pro jednotkovou vedlejší práci
$N_{nvopt}$	3,49	Kč	Pro náklady na nástroj a jeho výměnu
$N_{copt}$	30,14	Kč	Celkové operační náklady

## Závislost operačních nákladů a trvanlivosti na řezné rychlosti

$v_c$ [m/min]	$t_{AS}$ [min]	$T$ [min]	$N_{ASp}$ [Kč]	$N_{AVp}$ [Kč]	$N_{nv}$ [Kč]	$N_c$ [Kč]
120	1,79	334,587	25,01	15,00	0,27	40,29
150	1,43	127,034	20,01	15,00	0,57	35,59
180	1,19	57,580	16,68	15,00	1,05	32,73
210	1,02	29,493	14,29	15,00	1,76	31,06
240	0,89	16,521	12,51	15,00	2,76	30,26
257,56	0,83	12,160	11,65	15,00	3,49	30,14
270	0,79	9,909	11,12	15,00	4,08	30,20
300	0,71	6,273	10,01	15,00	5,81	30,81
330	0,65	4,148	9,10	15,00	7,98	32,08
360	0,60	2,843	8,34	15,00	10,68	34,02
390	0,55	2,009	7,70	15,00	13,95	36,65
420	0,51	1,456	7,15	15,00	17,87	40,01
450	0,48	1,079	6,67	15,00	22,50	44,17
480	0,45	0,816	6,25	15,00	27,91	49,16
510	0,42	0,627	5,89	15,00	34,17	55,06
540	0,40	0,489	5,56	15,00	41,36	61,92
570	0,38	0,387	5,27	15,00	49,55	69,82

## Vnější válcová plocha - maximální výrobnost

ROZMĚRY OBROBKU			
D	65	mm	Průměr obráběné plochy
l	120	mm	Délka obráběné plochy
ŘEZNÉ PODMÍNKY			
$a_p$	0,2	mm	Šířka záběru ostří
f	0,12	mm	Posuv na otáčku
$l_n$	3	mm	Délka náběhu
$l_p$	3	mm	Délka přeběhu
i	1	-	Počet záběrů
ČASY			
$t_{AVp}$	3	min	Jednotková vedlejší práce
$t_{AX}$	2	min	Jednotkový čas nepravidelné obsluhy
NÁKLADY			
$N_{hs}$	840	Kč	Hodina provozu stroje
$N_{vm}$	5	Kč	Minuta vedlejší práce
$N_{vnm}$	5	Kč	Náklady na výměnu nástroje za minutu
VBD			
$C_d$	235	Kč	Cena břitové destičky
$z_d$	1	-	Počet břitových destiček na nástroji
$z_b$	6	-	Počet břitů na destičce
$s_b$	0,9	-	Součinitel využití břitových destiček
KONSTANTY			
m	4,34	-	Exponent
$C_v$	458	-	Konstanta z Taylorova vztahu
$C_T$	3,53E+11	-	Konstanta z Taylorova vztahu
$N_{sm}$	14,00	Kč	Náklady na minutu strojní práce
$N_T$	53,52	Kč	Náklady na břit nástroje a jeho výměnu vztažené na jednu trvanlivost
$\tau$	0,952	-	Poměr dráhy nástroje a obráběné plochy
$v_{coptN}$	299,02	$M \cdot min^{-1}$	Optimální řezná rychlost
$n_{optN}$	1464,35	$min^{-1}$	Optimální otáčky
$T_{optN}$	6,36	min	Optimální trvanlivost
$L_{optN}$	1117,92	mm	Optimální relativní dráha nástroje vůči obrobku
$t_{AS}$	0,717	min	Optimální jednotkový strojní čas
$Q_T$	9,316034	ks	Počet obrobků
OPTIMÁLNÍ NÁKLADY			
$N_{sopt}$	10,04	Kč	Pro jednotkovou strojní práci
$N_{vopt}$	15,00	Kč	Pro jednotkovou vedlejší práci
$N_{nvopt}$	5,74	Kč	Pro náklady na nástroj a jeho výměnu
$N_{copt}$	30,78	Kč	Celkové operační náklady

## Závislost operačních časů a trvanlivosti řezného nástroje na řezné rychlosti

$v_c$ [m/min]	T [min]	$t_{ax}/Q_T$ [min]	$t_{AS}$ [min]	$t_{AVP}$ [min]	$t_{AO}$ [min]
90	1166,121	0,004	2,382	3	5,386
120	334,587	0,010	1,787	3	4,797
150	127,034	0,021	1,429	3	4,451
180	57,580	0,039	1,191	3	4,231
210	29,493	0,066	1,021	3	4,087
240	16,521	0,103	0,893	3	3,996
270	9,909	0,153	0,794	3	3,947
299,02	6,362	0,215	0,717	3	3,932
300	6,273	0,217	0,715	3	3,932
330	4,148	0,298	0,650	3	3,948
360	2,843	0,399	0,596	3	3,995
390	2,009	0,521	0,550	3	4,071
420	1,456	0,668	0,511	3	4,178
450	1,079	0,841	0,476	3	4,317
480	0,816	1,043	0,447	3	4,490

## Závislost operačních nákladů a trvanlivosti řezného nástroje na řezné rychlosti

$v_c$ [m/min]	T [min]	$N_{ASp}$ [Kč]	$N_{avp}$ [Kč]	$N_{nv}$ [Kč]	$N_c$ [Kč]
90	1166,121	33,35	15,00	0,10	48,46
120	334,587	25,01	15,00	0,27	40,29
150	127,034	20,01	15,00	0,57	35,59
180	57,580	16,68	15,00	1,05	32,73
210	29,493	14,29	15,00	1,76	31,06
240	16,521	12,51	15,00	2,76	30,26
270	9,909	11,12	15,00	4,08	30,20
299,02	6,362	10,04	15,00	5,74	30,78
300	6,273	10,01	15,00	5,81	30,81
330	4,148	9,10	15,00	7,98	32,08
360	2,843	8,34	15,00	10,68	34,02
390	2,009	7,70	15,00	13,95	36,65
420	1,456	7,15	15,00	17,87	40,01
450	1,079	6,67	15,00	22,50	44,17
480	0,816	6,25	15,00	27,91	49,16



## Příloha 3: Tabulky vypočítaných hodnot pro soustružení čelní plochy

## Čelní plocha – minimální náklady

ROZMĚRY OBROBKU			
d	35	mm	Malý průměr
D	125	mm	Velký průměr
ŘEZNÉ PODMÍNKY			
a <sub>p</sub>	0,2	mm	Šířka záběru ostří
f	0,12	mm	Posuv na otáčku
l <sub>n</sub>	2	mm	Délka náběhu
l <sub>p</sub>	2	mm	Délka přeběhu
i	1	-	Počet záběrů
ČASY			
t <sub>AVp</sub>	3	min	Jednotková vedlejší práce
t <sub>AX</sub>	2	min	Jednotkový čas nepravidelné obsluhy
NÁKLADY			
N <sub>hs</sub>	780	Kč	Hodina provozu stroje
N <sub>vm</sub>	5	Kč	Minuta vedlejší práce
N <sub>vnm</sub>	5	Kč	Náklady na výměnu nástroje za minutu
VBD			
C <sub>d</sub>	235	Kč	Cena břitové destičky
Z <sub>d</sub>	1	-	Počet břitových destiček na nástroji
Z <sub>b</sub>	6	-	Počet břitů na destičce
S <sub>b</sub>	0,9	-	Součinitel využití břitových destiček
KONSTANTY			
m	4,34	-	Exponent
C <sub>v</sub>	458	-	Konstanta z Taylorova vztahu
C <sub>T</sub>	3,53E+11	-	Konstanta z Taylorova vztahu
N <sub>sm</sub>	13,00	Kč	Náklady na minutu strojní práce
N <sub>T</sub>	53,52	Kč	Náklady na břit nástroje a jeho výměnu vztahené na jednu trvanlivost
τ	0,918	-	Poměr dráhy nástroje a obráběné plochy
V <sub>coptN</sub>	255,33	m·min <sup>-1</sup>	Optimální řezná rychlost
n <sub>optNmax</sub>	2322,13	min <sup>-1</sup>	Maximální optimální otáčky
T <sub>optN</sub>	12,63	min	Optimální trvanlivost
OPTIMÁLNÍ NÁKLADY			
N <sub>sopt</sub>	5,04	Kč	Pro jednotkovou strojní práci
N <sub>vopt</sub>	15,00	Kč	Pro jednotkovou vedlejší práci
N <sub>nvopt</sub>	1,51	Kč	Pro náklady na nástroj a jeho výměnu
N <sub>copt</sub>	21,55	Kč	Celkové operační náklady

## Závislost operačních nákladů a trvanlivosti na řezné rychlosti

$v_c$ [m/min]	$t_{AS}$ [min]	$T$ [min]	$N_{ASP}$ [Kč]	$N_{AVP}$ [Kč]	$N_{nv}$ [Kč]	$N_c$ [Kč]
120	0,825	334,587	10,72	15,00	0,12	25,84
150	0,660	127,034	8,58	15,00	0,26	23,83
180	0,550	57,580	7,15	15,00	0,47	22,62
210	0,471	29,493	6,13	15,00	0,79	21,91
240	0,412	16,521	5,36	15,00	1,23	21,59
255,33	0,388	12,628	5,04	15,00	1,51	21,55
270	0,367	9,909	4,76	15,00	1,82	21,58
300	0,330	6,273	4,29	15,00	2,58	21,87
330	0,300	4,148	3,90	15,00	3,55	22,45
360	0,275	2,843	3,57	15,00	4,75	23,33
390	0,254	2,009	3,30	15,00	6,21	24,51
420	0,236	1,456	3,06	15,00	7,95	26,02
450	0,220	1,079	2,86	15,00	10,01	27,87
480	0,206	0,816	2,68	15,00	12,42	30,10
510	0,194	0,627	2,52	15,00	15,21	32,73
540	0,183	0,489	2,38	15,00	18,41	35,79
570	0,174	0,387	2,26	15,00	22,05	39,31

## Čelní plocha – maximální výrobnost

ROZMĚRY OBROBKU			
d	35	mm	Průměr obráběné plochy
D	125	mm	Délka obráběné plochy
ŘEZNÉ PODMÍNKY			
a <sub>p</sub>	0,2	mm	Šířka záběru ostří
f	0,12	mm	Posuv na otáčku
l <sub>n</sub>	2	mm	Délka náběhu
l <sub>p</sub>	2	mm	Délka přeběhu
i	1	-	Počet záběrů
ČASY			
t <sub>AVp</sub>	3	min	Jednotková vedlejší práce
t <sub>AX</sub>	2	min	Jednotkový čas nepravidelné obsluhy
NÁKLADY			
N <sub>hs</sub>	840	Kč	Hodina provozu stroje
N <sub>vm</sub>	5	Kč	Minuta vedlejší práce
N <sub>vnm</sub>	5	Kč	Náklady na výměnu nástroje za minutu
VBD			
C <sub>d</sub>	235	Kč	Cena břitové destičky
Z <sub>d</sub>	1	-	Počet břitových destiček na nástroji
Z <sub>b</sub>	6	-	Počet břitů na destičce
S <sub>b</sub>	0,9	-	Součinitel využití břitových destiček
KONSTANTY			
m	4,34	-	Exponent
C <sub>v</sub>	458	-	Konstanta z Taylorova vztahu
C <sub>T</sub>	3,53E+11	-	Konstanta z Taylorova vztahu
N <sub>sm</sub>	14,00	Kč	Náklady na minutu strojní práce
N <sub>T</sub>	53,52	Kč	Náklady na břit nástroje a jeho výměnu vztažené na jednu trvanlivost
τ	0,918	-	Poměr dráhy nástroje a obráběné plochy
v <sub>coptV</sub>	301,54	m·min <sup>-1</sup>	Optimální řezná rychlost
n <sub>optV</sub>	2742,39	min <sup>-1</sup>	Optimální otáčky
T <sub>optV</sub>	6,13	min	Optimální trvanlivost
L <sub>optV</sub>	2018,84	mm	Optimální relativní dráha nástroje vůči obrobku
t <sub>AS</sub>	0,392	min	Optimální jednotkový strojní čas
Q <sub>T</sub>	20,35459	ks	Počet obrobků
OPTIMÁLNÍ NÁKLADY			
N <sub>sopt</sub>	4,59	Kč	Pro jednotkovou strojní práci
N <sub>vopt</sub>	15,00	Kč	Pro jednotkovou vedlejší práci
N <sub>nvopt</sub>	2,63	Kč	Pro náklady na nástroj a jeho výměnu
N <sub>copt</sub>	22,22	Kč	Celkové operační náklady

## Závislost operačních časů a trvanlivosti řezného nástroje na řezné rychlosti

$v_c$ [m/min]	T [min]	$t_{ax}/Q_T$ [min]	$t_{AS}$ [min]	$t_{AVp}$ [min]	$t_{Ao}$ [min]
90	1166,121	0,002	1,100	3	4,101
120	334,587	0,005	0,825	3	3,829
150	127,034	0,010	0,660	3	3,669
180	57,580	0,018	0,550	3	3,567
210	29,493	0,029	0,471	3	3,501
240	16,521	0,046	0,412	3	3,458
270	9,909	0,068	0,367	3	3,434
300	6,273	0,097	0,330	3	3,426
301,54	6,135	0,098	0,328	3	3,426
330	4,148	0,133	0,300	3	3,433
360	2,843	0,178	0,275	3	3,452
390	2,009	0,232	0,254	3	3,486
420	1,456	0,297	0,236	3	3,533
450	1,079	0,374	0,220	3	3,594
480	0,816	0,464	0,206	3	3,670

## Závislost nákladů a trvanlivosti řezného nástroje na řezné rychlosti

$v_c$ [m/min]	T [min]	$N_{Asp}$ [Kč]	$N_{AVp}$ [Kč]	$N_{nv}$ [Kč]	$N_c$ [Kč]
90	1166,121	15,39	15,00	0,05	30,44
120	334,587	11,55	15,00	0,12	26,67
150	127,034	9,24	15,00	0,26	24,49
180	57,580	7,70	15,00	0,47	23,17
210	29,493	6,60	15,00	0,79	22,38
240	16,521	5,77	15,00	1,23	22,00
270	9,909	5,13	15,00	1,82	21,95
300	6,273	4,62	15,00	2,58	22,20
301,54	6,135	4,59	15,00	2,63	22,22
330	4,148	4,20	15,00	3,55	22,75
360	2,843	3,85	15,00	4,75	23,60
390	2,009	3,55	15,00	6,21	24,76
420	1,456	3,30	15,00	7,95	26,25
450	1,079	3,08	15,00	10,01	28,09
480	0,816	2,89	15,00	12,42	30,31